



Manual de càlculs

ENGINYERIA QUÍMICA

Planta de producció d'anhídrid ftàlic

Laura Jinyi Zheng Lin

Noemi Martos Verdugo

Cristina González Savelieva

Jordi Malla Nualart

11	MANUAL DE CÀLCULS.....	3
11.1	TANCS D'EMMAGATZEMATGE.....	3
11.1.1	Consideracions de disseny.....	3
11.1.2	Càlcul de les dimensions del cos dels tancs.....	3
11.1.3	Càlcul del nombre de tancs	4
11.1.4	API 650	5
11.1.5	ASME	9
11.1.6	Mitja canya.....	15
11.1.7	Agitador.....	17
11.1.8	Venteig.....	19
11.1.9	Cubetes.....	20
11.1.10	Boca d'home	Error! Bookmark not defined.
11.1.11	Aïllament dels tancs.....	21
11.1.12	Tancs d'emmagatzematge de o-xilè	21
11.1.13	Tanc d'emmagatzematge del Therminol 59.....	22
11.1.14	Tanc d'emmagatzematge del Therminol VP1	24
11.1.15	Tanc pulmó	25
11.1.16	Tanc de condensats de MA.....	27
11.1.17	Tanc de condensats de PA	28
11.1.18	Tanc per a la sal	29
11.2	Reactor	30
11.2.1	Disseny teòric.....	30
11.2.2	Disseny mecànic del reactor	34
11.2.3	Tractament tèrmic del rector.....	37
11.3	Bescanviadors.....	39
11.3.1	Disseny dels bescanviadors	40
11.4	DECOMPOSER DP-0301.....	53
11.4.1	Disseny mecànic del decomposer.....	53

11.5 DECOMPOSER

DP-0302

56

11.6	COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ C-0301	58
11.6.1	Selecció del tipus de columna	59
11.6.2	Disseny mecànic de la columna	63
11.7	COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ C-0302	66
11.7.1	Selecció del tipus de columna	67
11.7.2	Disseny mecànic de la columna	67
11.8	DISSENY DE CANONADES	69
11.8.1	Càlcul del diàmetre nominal d'una fase	69
11.8.2	Càlcul del diàmetre nominal de dos fases	71
11.8.3	Gruix d'aïllant	71
11.9	BOMBES	72
11.9.1	Selecció de bombes	72
11.9.2	Càlcul de la potència de la bomba	76
11.9.3	NPSH	76
11.9.4	Bomba al buit	77
11.10	COMPRESSORS	77
11.11	SERVEIS DE PLANTA	78
11.11.1	Aire comprimit	78
11.11.2	Caldera d'oli tèrmic	79

11 MANUAL DE CÀLCULS

11.1 TANCES D'EMMAGATZEMATGE

11.1.1 Consideracions de disseny

En aquest apartat s'exposaran els càlculs que s'han realitzat a l'hora de dissenyar els tancs d'emmagatzematge de la planta de producció d'anhídrid ftàlic.

Es consideren tancs d'emmagatzematge de fluids, tots aquells tancs dissenyats per emmagatzemar un fluid immòbil durant un cert període de temps. Els productes que necessiten emmagatzematge i, per tant, requereixen de tancs d'emmagatzematge a la planta són l'o-xilè, l'oli tèrmic i la sal fosa. Així com també és necessari un tanc pulmó amb la finalitat de preservar el bon funcionament de la planta en cas de problemes tècnics.

Per determinar el disseny d'aquest tancs s'utilitza el codi API 650, de l'American, Petroleum Institute de l'any 1998, pels tancs que es troben a pressió atmosfèrica i pels tancs a pressió s'utilitza el codi ASME, American Society of Mechanical Engineers, del 1995.

En primer lloc, s'explicaran els codis utilitzats per calcular els espessors amb les seves respectives equacions. Ha estat necessari utilitzar dos codis diferents pel disseny dels tancs ja que, a la planta de producció d'anhídrid ftàlic hi ha tancs a pressió atmosfèrica i tancs a pressió. Els codis que s'han emprat pel correcte disseny són API 650 (tancs atmosfèrics) i ASME (tancs a pressió).

11.1.2 Càlcul de les dimensions del cos dels tancs

Per tal de dimensionar els tancs és indispensable conèixer les dimensions del cilindre que forma el cos dels tancs, aquests càlculs es realitzen amb la mateixa metodologia tant pels tancs a pressió atmosfèrica com pels tancs a pressió.

Per dissenyar els tancs es determina prèviament el volum de la substància a emmagatzemar segons les necessitats de la planta (per exemple: al cas dels tancs de o-xilè s'emmagatzemaran en tancs de 200 m³).

Una vegada que s'ha escollit el volum del tanc es calcula el diàmetre del cilindre a partir de l'equació següent:

$$D = \left(\frac{4 \cdot V}{\frac{\pi}{3}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11.1)$$

On:

D és el diàmetre del cilindre [m].

V és el volum del tanc [m³].

L'alçada del cilindre es calcula a partir de la relació entre l'alçada i el diàmetre del cilindre que és $H_{\text{CILINDRE}}/D=1,5$.

L'alçada del nivell del líquid es calcularà multiplicat l'alçada del cilindre per 0,8, ja que els tancs estaran omplerts al 80%.

11.1.3 Càlcul del nombre de tancs

Per tal de calcular el nombre de tancs que requereix cadascun dels productes a emmagatzemar s'ha seguit el procediment que es mostra a continuació. Tenint en compte que els tancs s'han de sobredimensionar un 20%, és a dir, que el seu nivell d'ocupació és del 80%, per motius de seguretat.

- En primer lloc, s'estableixen els dies de reserva.
- Càlcul del volum de reserva pels dies de reserva.

$$V_{\text{RESERVA}} = 24 \cdot Q \cdot \text{Dies de reserva} \quad (11.2)$$

On:

V_{RESERVA} és el volum de reserva [m³].

Q és el cabal volumètric [m³/h].

- Es calcula el nombre de tancs, sense sobredimensionar, és a dir, si els tancs estiguessin omplerts al 100%.

$$n = \frac{V_{\text{RESERVA}}}{V} \quad (11.3)$$

On:

V_{RESERVA} és el volum de reserva [m³].

V és el volum del tanc [m³].

n és el nombre de tancs sense sobredimensionar.

- Es calcula el nombre de tancs que calen a la planta, sobredimensionant-los.

$$N = 1,2 \cdot n \quad (11.4)$$

On:



N és el nombre de tancs necessaris.

n és el nombre de tancs sense sobredimensionar.

11.1.4 API 650

El codi estàndard API cobreix els requisits mínims pel disseny, fabricació instal·lació, materials e inspecció de tancs cilíndrics verticals, no refrigerats, amb sostre obert o tancat, construïts amb xapes d'acer soldades.

Cobreix tancs en que s'emmagatzemin fluids líquids, construïts d'acer amb un fons uniformement suportat per un llit de sorra, grava, formigó, asphalt, etc., dissenyats per suportar una pressió d'operació atmosfèrica (menor a 18 KPa) o pressions internes que no excedeixin el pes del sostre per unitat d'àrea i una temperatura d'operació menor a 93°C.

11.1.4.1 Disseny del fons

Les consideracions que s'han de tenir en compte en aquest apartat del codi API 650, condueix a utilitzar un fons pla per els tancs a pressió atmosfèrica. Aquest tipus de fons s'utilitzen habitualment per a tancs on la pressió no es elevada. La resistència permissibile del sòl ha de ser com a mínim de 1,465 kg/cm². També cal considerar que el gruix del fons del tanc acostuma a ser menor que el del propi del cos del tanc ja que el fons es troba suportat per una base d'asfalt que suportarà el pes del tanc.

Aquests tancs estaran suportats per una base d'asfalt d'aproximadament 30 cm de grossor (*Welded Steel Tanks for Oil Storage, API, 650*).

L'espessor mínim del fons, que ve donat per l'esforç de prova hidrostàtica del material (al cas del AISI 316L St = 1581 Kg/cm²), serà de 6,35 mm, excloent la corrosió permissibile especificada per l'usuari (2 mm). Sumant l'espessor mínim com a conseqüència de la prova hidrostàtica i la corrosió permissibile ens dona que l'espessor mínim serà de 8,35 mm.

11.1.4.2 Disseny del cos

L'espessor mínim que ha de tenir el cos del tanc es troba directament relacionat amb el diàmetre nominal de tanc en metres. Com tots els tancs a dissenyar tenen un diàmetre nominal menor de 15,24 m, l'espessor mínim serà de 4,76 mm més la corrosió permissibile (2 mm), per tant l'espessor mínim del cos serà de 6,76 mm.

El gruix de la paret del cos ha de ser major que el calculat per condicions de càrrega hidrostàtica però en cap cas ha de ser menor que el gruix mínim del fos i la placa anular, que s'ha determinat anteriorment.

Pel càlcul de l'espessor del cos s'ha utilitzat el mètode d'un peu que la única consideració a tenir en compte és que només és aplicable a tancs amb un diàmetre igual o menor a 60,96 m. Amb aquest mètode es calcula l'espessor requerit de la paret del tanc per condicions de disseny i de prova hidrostàtica. Aquesta última prova aporta informació de l'espessor del tanc si aquest s'omple d'aigua en comptes de amb la substància a emmagatzemar. Si l'espessor calculat per la prova hidrostàtica és major que el calculat per condicions de disseny, s'utilitzarà l'obtingut per condicions de prova hidrostàtica. Les equacions que es fan servir són les següents:

$$t_d = \frac{0.005 \cdot D \cdot (H - 30.48) \cdot G}{S_d} + C \quad (11.5)$$

$$t_t = \frac{0.005 \cdot D \cdot (H - 30.48)}{S_t} + C \quad (11.6)$$

On:

t_d és el gruix per prova hidrostàtica [mm].

t_t és el gruix en condicions de disseny [mm].

D és el diàmetre nominal del tanc [cm].

H és l'altura de disseny del nivell del tanc [cm].

S_t és l'esforç permisible en condicions de prova hidrostàtica [kg/cm²].

S_d és l'esforç permisible en condicions de disseny [kg/cm²].

C és la corrosió admissible [m].

G és la densitat relativa del líquid a emmagatzemar [adimensional].

11.1.4.3 Disseny dels capçals

Independentment de la forma o el mètode de suport escollit és necessari que el sostre del tanc dissenyat pugui suportar una càrrega mínima de 17,6 kg/cm² més la càrrega morta ocasionada pel mateix, per tant, les plaques del sostre han de tenir com a mínim un gruix nominal de 4,7 mm. A més a més, totes les peces estructurals de sostres suportats tindran un gruix mínim nominal de 4,32 mm més la corrosió admissible, tant les internes com les externes.

Les consideracions primordials pel disseny d'aquest tipus de sostres és el diàmetre dels tancs que no han d'excedir els 18,29 m, sent recomanable dissenyar els tancs amb un diàmetre no superior a 12,19 m.

Els tancs a pressió atmosfèrica seran capçals de sostre fix de forma cònica, per tant caldrà que estiguin autosuportats amb un pendent de entre 9,5° i 37°. Així doncs, s'ha considerat idoni escollir un angle de 20° respecte l'horitzontal.

El gruix del sostre es calcula a partir de l'equació següent:

$$T_t = \frac{D}{4800 \cdot \sin \theta} + C \quad (11.7)$$

On:

T_t és el gruix mínim requerit [cm].

D és el diàmetre mitjà del tanc [cm].

θ és l'angle respecte a la horitzontal [°].

A continuació es calculen les dimensions dels capçals cònics.

$$h_{\text{capçal cònic intern}} = \frac{\sin(\theta) \cdot r}{\cos(\theta)} \quad (11.8)$$

$$h_{\text{capçal cònic extern}} = h_{\text{capçal cònic intern}} + T_t \quad (11.9)$$

On:

r és el radi del tanc [m].

θ és l'angle respecte l'horitzontal [°].

$h_{\text{capçal cònic intern}}$ és l'alçada del con [m].

$h_{\text{capçal cònic extern}}$ és l'alçada del con [m].

T_t és el gruix mínim requerit [m].

11.1.4.4 Alçada dels tanc atmosfèrics

L'alçada des equips depèn del tipus de capçals i fons que s'utilitzin. Tot seguit es troben les formules que permetran calcular l'alçada dels tancs intern i l'alçada del tanc extern (on s'inclouen els gruixos).

$$H_{equip\ intern} = h_{CAPÇAL\ CÒNIC} + H_{CILINDRE} \quad (11.10)$$

$$H_{equip\ extern} = H_{equip\ intern} + Tt + Gruix\ fons \quad (11.11)$$

11.1.4.5 Càlcul del volum del equip

El volum del equip ve donat pel volum del capçal, el volum del cilindre i el volum del fons.

$$V_{material\ cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot H_{CILINDRE} \quad (11.12)$$

$$V_{material\ capçal\ cònic} = \frac{\pi}{3} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot h_{capçal\ cònic\ extern} \quad (11.13)$$

$$V_{material\ fons} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i + 0,051)^2 \cdot t \quad (11.14)$$

On:

t és el sobregruix de la placa anular [m].

11.1.4.6 Càlcul del pes del equip

El càlcul es basa en l'estimació del volum que ocupa el material del què està fet, que juntament amb la densitat del material permetrà determinar el pes dels equips. Per raons de seguretat tots els equips es sobredimensionen entre un 20%. Aquest sobredimensionament cobreix el pes dels complements que porten els equips. Pel càlcul del cos del tanc buit es calculen mitjançant l'equació (11.15).

$$pes\ material\ cilindre = V_{material\ cilindre} \cdot \rho_{material} \quad (11.15)$$

Pel càlcul del fons del tanc s'utilitza l'equació (11.16).

$$pes\ fons = V_{material\ fons} \cdot \rho_{material} \quad (11.16)$$

Pel que fa els capçals cònic es calcula mitjançant l'equació (11.17).

$$pes\ cònic = V_{material\ capçal\ cònic} \cdot \rho_{material} \quad (11.17)$$

La suma dels pesos del cos cilíndric, el fons i els capçals cònic és el pes total del tanc.

$$pes\ total = pes\ cilindre + pes\ fons + pes\ cònic \quad (11.18)$$

Amb l'equació (11.19) es pot determinar el pes del tanc amb líquid.

$$pes\ total\ ple = pes\ total + 0,5 \cdot V_{líquid} \cdot \rho_{líquid} \quad (11.19)$$

11.1.5 ASME

Abans de realitzar el càlcul del gruix, és necessari calcular i determinar alguns factors que influeixen en el disseny mecànic dels tancs.

➤ Pressió hidrostàtica

La pressió hidrostàtica (ΔP) correspon a la pressió que exerceix un pes d'un fluid en repòs.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H \quad (11.20)$$

On:

ρ és la densitat del fluid [kg/m^3].

g és la força de la gravetat [m/s^2].

H és l'alçada de la columna del líquid [m].

➤ Pressió d'operació

La pressió d'operació (P_{op}) és la pressió a la que està sotmesa un equip en condicions d'operació normal.

➤ Pressió de disseny

La pressió de disseny (P) és el valor que s'ha d'utilitzar pel disseny de les parts constructives dels recipients que es trobin a pressió, es determina mitjançant l'equació (11.21)

$$P = P_{op} + \Delta P + 0.15 \cdot (P_{op} + \Delta P) \quad (11.21)$$

➤ Temperatura d'operació

Pel cas de la temperatura seria el mateix concepte que pel cas de les pressió, és a dir, la temperatura d'operació (T_{op}) és la temperatura a la que treballa un equip en condicions normals d'operació.

➤ Temperatura de disseny

La temperatura de disseny (T) és la temperatura d'operació però que per motius de seguretat se sumen o resten 15°C.

$$T = T_{op} \pm 15 \quad (11.22)$$

➤ Límit elàstic

El límit elàstic (S) és el màxim esforç al qual es pot sotmetre el material. El valor pot anar variant depenent del material escollit i la temperatura de treball.

A la taula 11.1 es poden veure els valors dels límits elàstics per a diferents materials.

Taula 11.1.- Valors dels límits elàstics dels materials.

		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)												
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	—	—	—
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	—	—

➤ Factor de soldadura E

La unió entre plaques es realitza mitjançant una soldadura, com que aquesta té una certa discontinuïtat i la seva realització pot comportar defectes, la zona de la soldadura es pot veure debilitada. Per tant, el codi ASME introdueix una reducció del límit elàstic. Si es considera que el radiografiat és parcial el valor de E és de 0.85 i si el radiografiat és total el valor és de 1.

➤ Factor M

El factor M correspon a la relació entre els radis que formen el capçal torisfèric, r i L, on aquests corresponen als radis de la figura 11.1 i es calculen amb les equacions (11.23) i (11.24).

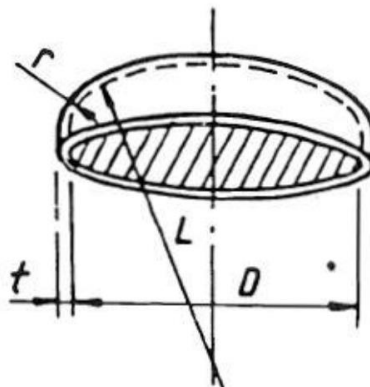


Figura 11.1: Variables pel capçal torièsferic.

$$L = D_e \quad (11.23)$$

$$r = 0.1 \cdot L \quad (11.24)$$

Una cop calculats els paràmetres L i r, es pot trobar el valor de M amb la taula 11.2.

Taula 11.2- Valors del factor M en funció de la relació L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																

➤ Gruix per corrosió

El gruix per corrosió (C_1) ha de ser suficient per compensar la corrosió, abrasió mecànica o erosió que pot patir l'equip al llarg de la seva vida útil. Aquest valor pot variar depenent del material que s'utilitzi però sol tenir un valor que oscil·la entre 1 a 6 mm.

➤ Tolerància de fabricació

En les curvatures dels fons torièsferic es perd certa part del gruix per una deformació, per tant, s'addiciona un 10% del gruix del capçal obtinguts inicialment.

11.1.5.1 Càlcul gruix del cos del tanc

Pel càlcul del gruix necessari pel cos cilíndric del tanc per les condicions de treball es determina mitjançant l'equació (11.25).

$$t_{cos} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1 \quad (11.25)$$

On:

t_{cos} és el gruix mínim del cilindre [in]

P és la pressió de disseny [psi]

R és el radi del tanc [in]

S és el límit elàstic del material [in]

E és el factor de soldadura

C_1 és la corrosió del material [in].

11.1.5.2 Càlcul del gruix del capçal toriesfèric

En aquest cas per calcular el gruix, s'utilitza l'equació (11.26) que correspon a capçals on la relació L/r és més petita de 16 2/3.

$$t_{capçal} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C_1 + C_2 \quad (11.26)$$

On:

$t_{capçal}$ és el gruix mínim del capçal [in].

L és el radi de l'esfera que forma el capçal toriesfèric [in].

M és la constant que relaciona els radis del fons toriesfèric [in].

C_2 és la corrosió de tolerància a la fabricació [in].

11.1.5.3 Càlcul de l'alçada capçal toriesfèric

Per calcular l'alçada del capçal toriesfèric s'utilitzen les equacions (11.27), (11.28) i (11.29).

$$h_1 = 3.5 \cdot t_{capçal} \quad (11.27)$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot D_e - 0.455 \cdot t_{capçal} \quad (11.28)$$

$$H_{toriesfèric} = h_1 + h_2 + t_{capçal} \quad (11.29)$$

11.1.5.4 Càlcul del cos cilíndric

Per determinar el gruix necessari per tal d'evitar deformacions del material es determina la pressió externa del cilindre. El mètode a seguir és un procés iteratiu que consisteix en la suposició d'un gruix i calcular si aquest aguantaria la pressió a la que està sotmès el cos des de l'exterior. Si la pressió admissible calculada és inferior a la pressió externa permesa s'haurà de tornar al principi de la iteració.

$$Pa = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \frac{D_o}{t_r}} \quad (11.30)$$

On t_r és el gruix de la placa sense tenir en compte els factors C_1 i C_2 .

Per determinar el paràmetre B es necessari el càlcul de les relacions L'/D_o i D_o/t mitjançant les equacions (11.31) i (11.32).

$$L' = L + \frac{2 \cdot H_{toriesfèric}}{3} \quad (11.31)$$

$$D_o = D_{i \text{ del tanc }} + 2 \cdot t \quad (11.32)$$

Un cop determinades les relacions, cal trobar el factor A mitjançant la figura 11.X

Si la relació L'/D_o és menor que L'/D_o requerit és recomanable l'ús de reforços.

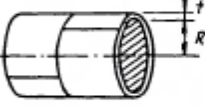
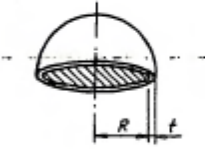
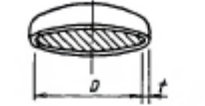
INTERNAL PRESSURE FORMULAS IN TERMS OF INSIDE DIMENSIONS	
P = DESIGN PRESSURE OR MAX. ALLOWABLE WORKING PRESSURE, PSI S = STRESS VALUE OF MATERIAL, PSI., PAGE 131. E = JOINT EFFICIENCY, PAGE 118. R = INSIDE RADIUS, INCHES D = INSIDE DIAMETER, INCHES t = WALL THICKNESS, INCHES C.A. = CORROSION ALLOWANCE, INCHES	
A 	CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM)¹
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$ $P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$ 1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.355 SE, the formulas given in the Code U.A. 2 shall be applied.
B 	SPHERE and HEMISPHERICAL HEAD
	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$ $P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$ 1. For heads without a straight flange, use the efficiency of the head to shell joint if it is less than the efficiency of the seams in the head. 2. When the wall thickness exceeds 0.356 R or P exceeds 0.665 SE, the formulas given in the Code U.A. 3, shall be applied.
C 	2:1 ELLIPSOIDAL HEAD
	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$ $P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$ 1. For ellipsoidal heads, where the ratio of the major and minor axis is other than 2:1, see Code U.A. 4(c)

Figura 11.2: Codi ASME.

Un cop determinat el factor A es calcula el factor B. En cas que el valor d'A quedés a l'esquerra de la corba s'utilitza l'equació (11.33) per realitzar el càlcul de la pressió externa.

$$Pa = \frac{2 \cdot A \cdot E}{3 \cdot \frac{D_o}{t_r}} \quad (11.33)$$

11.1.5.5 Càlcul dels capçals toriesfèric

Pel que fa al disseny dels capçals toriesfèric cal seguir el procés iteratiu ja esmentat anteriorment. Primer es calcula el gruix mínim, un cop determinat es suposa un valor de

gruix que sigui igual o major que el valor trobat anteriorment i es determina el valor de A amb l'equació (11.34).

$$A = \frac{0.125}{\frac{R}{t_{sup}}} \quad (11.34)$$

Seguidament s'obté el valor de B mitjançant les figures 11.35 per trobar finalment la pressió admissible.

$$Pa = \frac{B}{\frac{R}{t_{sup}}} \quad (11.35)$$

Si la pressió admissible és menor que la pressió externa es torna a suposar un valor.

11.1.5.6 Pes del tanc

El càlcul del cos del tanc buit es determina mitjançant l'equació (11.36).

$$pes\ cilindre = V_{cilindre} \cdot \rho_{material} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot H \cdot \rho_{material} \quad (11.36)$$

Pel que fa al pes del torisfèric, s'utilitzen les equacions següents.

$$V_{capçal\ superior} = 0.0809 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11.37)$$

$$V_{capçal\ inferior} = 0.0809 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11.38)$$

$$pes\ capçal = V_{capçal} \cdot \rho_{material} \quad (11.39)$$

La suma dels pesos del cos cilíndric i els capçals és el pes total del tanc.

$$pes\ total = pes\ cilindre + pes\ capçal\ superior + pes\ capçal\ inferior \quad (11.40)$$

Amb l'equació (11.41) es pot determinar el pes del tanc ple.

$$pes\ total\ ple = pes\ total + V_{líquid} \cdot \rho_{líquid} \quad (11.41)$$

11.1.6 Mitja canya

Alguns tancs dels procés requereixen un manteniment de la temperatura. Per fer-ho, s'utilitza una mitja canya. El procediment de càlcul per al disseny de la mitja canya es presenta a continuació.

Primerament s'ha de tenir en compte el cabal de calor que s'ha de retirar de l'equip que es vol dissenyar la mitja canya.

Seguidament es calcula el cabal de refrigerant necessari mitjançant un balanç d'energia calorífica amb l'equació (11.42).

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (11.42)$$

On Q és la calor alliberada de l'equip en [kJ/kg].

m és el cabal màssic del fluid tèrmic [kg/h].

Cp és la capacitat calorífica del fluid tèrmic [kJ/kg·K].

ΔT és la variació de la temperatura del fluid tèrmic [K].

Es suposa una velocitat de circulació típica del fluid tèrmic de 16 m/s ja que és vapor i amb l'equació (11.44) es calcula el diàmetre intern de la mitja canya.

$$A = \frac{Q_v}{v} \quad (11.43)$$

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad (11.44)$$

On A és l'àrea de pas del fluid tèrmic a la mitja canya [m²].

Q_v és el cabal volumètric del fluid tèrmic [m³/s]

v és la velocitat del fluid tèrmic [m/s].

A continuació es calcula l'àrea d'intercanvi de calor mitjançant l'equació (11.45).

$$A_{intercanvi} = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad (11.45)$$

On U és el coeficient global de transferència de calor, el fluid calent és vapor i el fluid fred és una mescla orgànica i el rang de valors es comprèn entre 500 i 1000 W/m²·K i s'ha escollit un valor de 500 W/m²·K.

ΔT_{ml} és la mitjana logarítmica de les diferències de temperatures.

Un cop calculat l'àrea d'intercanvi, es calcula la disposició de la mitja canya. Primer es calcula la longitud de la mitja canya amb l'equació (11.46).

$$L = \frac{A_{intercanvi}}{\pi \cdot D_e} \quad (11.46)$$

L'àrea de l'espira es calcula considerant la longitud de l'espira com el perímetre del reactor i l'altura com el diàmetre interior de la mitja canya.

$$A_{espira} = \pi \cdot D_{reactor} \cdot D_i \quad (11.47)$$

Seguidament es calcula el nombre d'espises, és a dir, el nombre de voltes que dóna la mitja canya.

$$N_{espira} = \frac{A_{intercanvi}}{A_{espira}} \quad (11.48)$$

Un cop obtingut el nombre d'espises, es calcula la separació que ha d'existir entre elles per a que estiguin uniformement distribuïdes.

$$d_{espira} = \frac{h_{líquid} - D_t \cdot N_{espira}}{N_{espira} - 1} \quad (11.49)$$

On $h_{líquid}$ correspon a l'altura del líquid de l'equip.

Finalment cal comprovar que l'àrea d'intercanvi de calor calculada no és superior a l'àrea disponible per a aquest intercanvi amb l'equació (11.50).

$$A_{disponible} = \pi \cdot D_{reactor} \cdot h_{líquid} \quad (11.50)$$

Si $A_{disponible} > A_{intercanvi}$ es podrà utilitzar la mitja canya.

11.1.7 Agitador

A la planta de producció d'anhídrid ftàlic es necessari homogeneïtzar una sèrie d'equips, entre aquests equips es troba el tanc pulmó TP-0301. Aquest càlcul és aplicable a la resta d'equips que tinguin un agitador.

11.1.7.1 Dimensionament

S'ha escollit un agitador de turbina rushton de 6 pales en un disc. Una vegada escollit el tipus d'agitador es dimensiona, seguint les equacions següents.

$$W = 0,1 \cdot D_T \quad (11.51)$$

$$d_2 = \frac{1}{3} \cdot D_T \quad (11.52)$$

$$d_1 = \frac{3}{4} \cdot d_2 \quad (11.53)$$

$$d_3 = \frac{1}{4} \cdot d_2 \quad (11.54)$$

$$h_2 = \frac{1}{3} \cdot D_T \quad (11.55)$$

$$h_3 = 0,2 \cdot d_2 \quad (11.56)$$

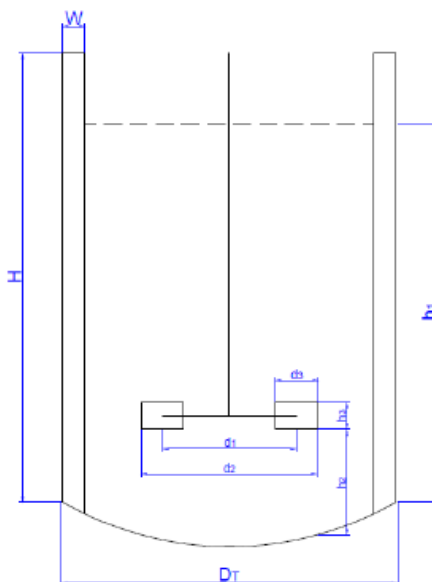


Figura 11.3: Dimensions de l'equip a dissenyar amb agitador.

S'han de tenir en compte els eixos d'agitació. Que si s'instal·len a l'agitador han d'estar separats per una distància igual a d_2 .

11.1.7.2 Potència requerida

Una vegada dimensionat, és necessari calcular la potència requerida de l'agitador. És necessari calcular el nombre de potencia (N_p), que ve donat pel tipus de catalitzador i el Reynolds.

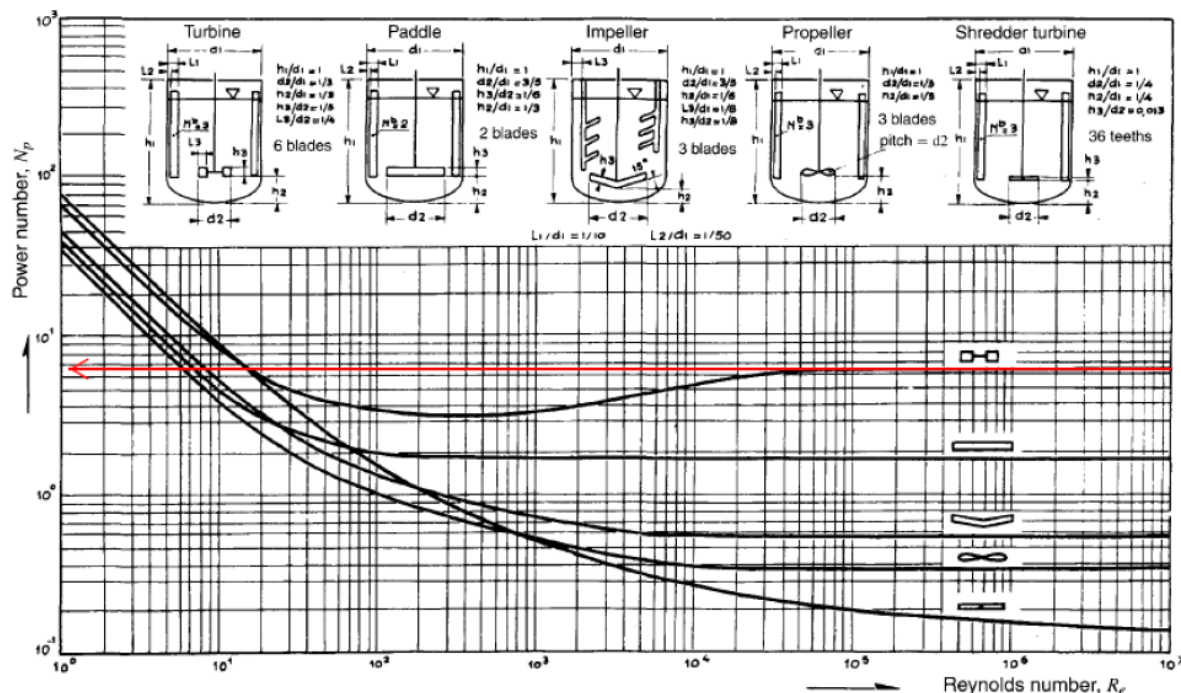


Figura 11.4: Variació del número N_p en funció del Reynolds per a diferents tipus d'agitador.

S'estima que el règim es turbulent, i que per tant pel tipus d'agitador N_p és igual a 6,5.

Tot seguit es calcula la velocitat d'agitació (N_R), que ha de ser major a N_{Rm} i es calcula a partir de l'equació següent:

$$N_{Rm} = \frac{2}{\pi \cdot d_2} \quad (11.57)$$

Una vegada determinat, es calcula el nombre de Reynolds per comprovar que la suposició inicial és correcte. Si es confirma, es calcula la potència a partir de la següent equació:

$$P_L = N_p \cdot \mu \cdot N_R^3 \cdot d_2^5 \quad (11.58)$$

La potència total serà P_L multiplicada pel nombre d'eixos.

11.1.8 Venteig

El sistema de venteig o alliberament de pressió dels tancs és necessari per preveure la formació del buit o l'augment o disminució de pressió interna. Així s'evita la deformació dels capçals de les parets com a conseqüència de les variacions de pressions produïdes per efecte de càrrega i descàrrega o la variació brusca de la temperatura.

El disseny dels venteig segueixen la normativa ITC-MIE-APQ1 (Emmagatzemament de líquids inflamables i combustibles). La normativa indica que el sistema de venteig tindrà com a mínim la mida igual o major a una de les canonades d'entrada o sortida del tanc però en cap moment tindrà un diàmetre inferior a 35 mm.

11.1.9 Cubetes

Els recipients de superfície per l'emmagatzematge han de disposar d'una cubeta de retenció. El fons de la cubeta ha de tenir un cert pendent de manera que el producte vessat vagi a parar de la manera més ràpida possible cap a les zones més allunyades dels recipients.

Per determinar el dimensionament de la cubeta es segueix la normativa **ITC-MIE-APQ1 (Almacenamiento de líquidos inflamables i combustibles)**. Primer es defineixen les distàncies entre els tancs i les parets dels tancs i les cubetes.

$$\text{Distància entre tancs} = \frac{D_{\text{tanc}}}{2} \quad (11.59)$$

Es considera que la distància entre la paret del tanc i la cubeta ha de ser d'un metre.

Un cop determinades les distàncies entre els tancs, es calculen les dimensions de la cubeta amb les equacions (11.60), (11.61), (11.62), (11.63) i (11.64).

$$A_{\text{ocupada}} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot D_{\text{tanc}}^2 \quad (11.60)$$

$$L_{\text{cubeta}} = D_{\text{tanc}} \cdot \frac{N}{2} + D_{\text{entre tancs}} \cdot \left(\frac{N}{2} + 1\right) + 2 \cdot D_p \quad (11.61)$$

$$W_{\text{cubeta}} = 2 \cdot D_{\text{tanc}} + 2 \cdot D_p + D_{\text{entre tancs}} \quad (11.62)$$

$$A_{\text{lliure}} = L_{\text{cubeta}} \cdot W_{\text{cubeta}} - A_{\text{ocupada}} \quad (11.63)$$

$$h_{\text{cubeta}} = \frac{V_{\text{tanc}}}{A_{\text{lliure}}} \quad (11.64)$$

On:

A_{ocupada} és l'àrea ocupada pels tancs [m²].

N és el número de tancs.

L_{cubeta} és la longitud de la cubeta [m].

$D_{\text{entre tancs}}$ és la distància entre tancs [m].

D_p és la distància entre la paret del tanc i la cubeta [m].

W_{cubeta} és l'ampla de la cubeta [m].

A_{lliure} és l'àrea lliure de la cubeta [m²].

H_{cubeta} és l'alçada de la cubeta [m].

11.1.10 Aïllament dels tancs

La temperatura és una de les variables a tenir en compte més importants al llarg del procés. Si no és correcte, les condicions del procés varien i, per tant, el producte que s'obté no és l'esperat. Per variar la temperatura del fluid del procés als dipòsits sigui correcte, s'utilitzen aïllants, en aquest cas, llana de roca. A continuació es mostra l'espessor escollit per als diferents tancs que hi ha al procés.

Taula 11.3.- Espessors i aïllants pels diferents tancs.

Tanc	Material aïllant	Espessor de l'aïllant [cm]
Tancs d'o-xilè	Llana de roca	10
Tanc de Therminol VP1	Llana de roca	10
Tanc Therminol 59	Llana de roca	10
Tanc pulmó	Llana de roca	10
Tanc d'emmagatzematge de sal	Llana de roca	10

11.1.11 Tancs d'emmagatzematge de o-xilè

L'o-xilè és un líquid inflamable de classe B1, per les seves característiques és recomanable la inertització dels seus tancs d'emmagatzematge. El seu punt d'inflamabilitat és de 31°C, per aquest motiu s'ha decidit mantenir el tanc a 25°C, tot i que no és fins als 464°C que s'autoinflama s'ha decidit prendre aquesta mesura addicional tot i no ser imprescindible, per fer-ho caldrà un sistema de refrigeració.

11.1.11.1 Disseny mecànic dels tancs d'emmagatzematge d'o-xilè

Pel seu disseny s'utilitza el codi API i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11. 4.- Resultats obtinguts del disseny dels tancs d'o-xilè.

Nº tancs	4	COS CILINDRIC	
Temps stock [dies]	3	t [mm]	4,76
Volum disseny [m ³]	200	Pes [Tn]	5,479
Nivell ocupació (%)	80	CAPÇAL CÒNIC	

Pressió [kPa]	101,3	Angle [°]	20
ΔP [kPa]	57,18	H cònic [m]	1,01
Temperatura [°C]	25,0	Tt [mm]	6,70
D [m]	5,537	Pes [kg]	156
H cilindre [m]	8,306	FONS	
H líquid [m]	6,645	Gruix [mm]	8,35
H total [m]	9,313	Pes [kg]	1600
Material	AISI 316L	TANC	
Densitat material [kg/m ³]	7960		
Sd [psi]	1560	Pes total buit [Tn]	7,235
St [psi]	15801	Pes total amb líquid [Tn]	94,65

11.1.11.2 Inertització

Com l'o-xilè és un líquid inflamable de classe B1, és necessari inertitzar els tancs que emmagatzemen aquesta substàncies, com recomana la normativa vigent aplicada. Cada vegada que es realitzi una parada s'omplirà el tanc amb el nitrogen corresponent abans de bombejar o-xilè dins del tanc. Així com també es realitzarà un control amb vàlvules *blanketing* per tal de mantenir els tancs inertitzats en tot moment duran el procés de fabricació de l'anhídrid ftàlic.

11.1.11.3 Cubeta del tanc d'emmagatzematge d'o-xilè

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.5- Resultats del dimensionament de les cubetes dels tancs d'o-xilè.

D tancs [m]	5,547
D entre tancs [m]	2,773
N	4
Àrea ocupada [m ²]	96,65
Dp [m]	1
L cubeta [m]	15,87
W cubeta [m]	15,87
A lliure [m ²]	155,1
h cubeta [m]	1,543

11.1.12 **Tanc d'emmagatzematge del Therminol 59**

Amb la finalitat d'emmagatzemar el *Therminol 59* del circuit del SC en cas de necessitat, s'ha instal·lat un tanc amb aquest objectiu a l'àrea de serveis (A-800).

Es disposarà d'un tanc d'emmagatzematge de 25 m³. Un cop establerta aquesta restricció, es determina el diàmetre i l'alçada que tindran les tancs i es segueix el codi ASME.

11.1.12.1 Disseny mecànic dels tancs d'emmagatzematge de Therminol 59

Pel seu disseny s'utilitza el codi API i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11.6.- Resultats obtinguts del disseny del tanc de Therminol 59.

Nº tancs	1	COS CILINDRIC	
Temps stock [dies]	-	t [mm]	4,76
Volum disseny [m ³]	25	Pes [Tn]	1,371
Nivell ocupació (%)	80	CAPÇAL CÒNIC	
Pressió [kPa]	101,3	Angle [°]	20
ΔP [kPa]	30,32	H cònic [m]	0,5038
Temperatura [°C]	25,0	Tt [mm]	6,70
D [m]	2,769	Pes [kg]	39,00
H cilindre [m]	4,153	FONS	
H líquid [m]	3,332	Gruix [mm]	8,350
H total [m]	4,657	Pes [kg]	400,1
Material	AISI 316L	TANC	
Densitat material [kg/m ³]	7960		
Sd [psi]	1560	Pes total buit [kg]	1810
St [psi]	1581	Pes total amb líquid [Tn]	13,34

11.1.12.2 Cubeta del tanc d'emmagatzematge de Therminol 59

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.7.- Resultats del dimensionament de la cubeta dels tancs de Therminol 59.

D tancs [m]	2,778
D entre tancs [m]	1,389
N	1
Àrea ocupada [m ²]	6,061
Dp [m]	1,00
L cubeta [m]	2,695
W cubeta [m]	8,945
A lliure [m ²]	18,04
h cubeta [m]	1,658

11.1.13 Tanc d'emmagatzematge del Therminol VP1

Amb la finalitat d'emmagatzemar el Therminol VP1 del circuit del SC en cas de necessitat, s'ha instal·lat un tanc amb aquest objectiu a l'àrea de serveis (A-800).

Es disposarà d'un tanc d'emmagatzematge de 5 m³. Un cop establerta aquesta restricció, es determina el diàmetre i l'alçada que tindran les tancs i es segueix el codi ASME.

11.1.13.1 Disseny mecànic dels tancs d'emmagatzematge de Therminol VP1

Pel seu disseny s'utilitza el codi API i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11.8.- Resultats obtinguts del disseny del tanc de Therminol VP1.

Nº tancs	1	COS CILINDRIC	
Temps stock [dies]	-	t [mm]	4,760
Volum disseny [m ³]	5	Pes [Tn]	0,4694
Nivell ocupació (%)	80	CAPÇAL CÒNIC	
Pressió [kPa]	101,3	Angle [°]	20
ΔP [kPa]	20,18	H cònic [m]	0,2946
Temperatura [°C]	25,0	Tt [mm]	6,700
D [m]	1,619	Pes [kg]	13,35
H cilindre [m]	2,429	FONS	
H líquid [m]	1,943	Gruix [mm]	8,350
H total [m]	2,723	Pes [kg]	1368
Material	AISI 316L	TANC	
Densitat material [kg/m ³]	7960		
Sd [psi]	1560	Pes total buit [kg]	619,6
St [psi]	1581	Pes total amb líquid [kg]	3228

11.1.13.2 Cubeta del tanc d'emmagatzematge de Therminol VP1

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.9.- Resultats del dimensionament de la cubeta dels tancs de Therminol VP1.

D tancs [m]	1,629
D entre tancs [m]	0,8143
N	1
Àrea ocupada [m ²]	2,083
Dp [m]	1
L cubeta [m]	2,407

W cubeta [m]	6,072
A lliure [m²]	12,53
h cubeta [m]	0,4774

11.1.14 Tanc pulmó

El tanc pulmó s'utilitza com a reserva per si algun equip de la planta necessita manteniment de manera imprevista i que la producció pugui continuar mentre es repara el problema que pugui haver sorgit.

11.1.14.1 Disseny mecànic del tanc pulmó

Pel seu disseny s'utilitza el codi ASME i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11.10.- Resultats obtinguts del disseny dels tancs pulmó.

Nº tancs	1	D [m]	4,409
Temps stock [dies]	19	H cilindre [m]	6,592
Pressió [kPa]	103	H líquid [m]	5,274
Pressió disseny [psi]	27,65	H total [m]	8,374
Volum disseny [m³]	100	COS CILÍNDRIC	
ΔP [psi]	9,102	t [mm]	7
Temperatura [°C]	155	Pes [kg]	5080
Temperatura disseny [°C]	170	CAPÇAL TORIESFÈRIC	
densitat fluid emmagatzemat [kg/m³]	1213	L = D [in]	173,6
Material	AISI 316L	r [in]	17,36
densitat material [kg/m³]	7960	L/r	10
S [psi]	15700	M	1,54
E	0,85	t [mm]	10
C1 [mm] / 20 anys	2,00	H toriesfèric [m]	0,8908
C2 [mm] / 20 anys	0,6558	Ocupació del tanc [%]	80
Pes total tanc buit [kg]	6128		
Pes total tanc omplert [Tn]	74,72		

11.1.14.2 Mitja canya

Tot seguit s'adjunten els resultats de les especificacions de la mitja canya que mantindrà el tanc pulmó a 155°C.

Taula 11.11.- Resultats obtinguts de la mitja canya del tanc pulmó.

Q [kJ/kg]	$5,986 \cdot 10^5$
m vapor [kg/h]	263,5
Q_v [m³/s]	0,02434

A nominal [m ²]	$1,521 \cdot 10^{-3}$
D mitja canya [m]	0,04401
A espira [m ²]	0,6096
ΔT_{ml}	28,73
L [m]	83,72
N espira	19
D espira [m]	0,2465
A disponible [m ²]	73,05

11.1.14.3 Agitador

Tot seguit s'adjunten els resultats de les especificacions de l'agitador del tanc pulmó.

Taula 11.12.- Resultats obtinguts de l'agitador del tanc pulmó.

Nº eixos d'agitació	1	Np	6,5
H [m]	6,592	NRm [s ⁻¹]	0,4332
Dt [m]	4,409	NR [s ⁻¹]	0,50
W [m]	0,4409	Re	$9.18 \cdot 10^5$
d ₂ [m]	1,470	D ₂ [m ²]	1,470
d ₁ [m]	1,102	viscositat fluid [Pa·s]	0.001427
h ₁ [m]	5,274	Densitat fluid [kg/m ³]	1213
h ₂ [m]	0,3674	Potència [kW]	6,756
h ₃ [m]	0,2939	Potència total [kW]	6,756
Distància entre eixos	1,5		

11.1.14.4 Cubeta del tanc pulmó

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.13.- Resultats del dimensionament de la cubeta del tanc pulmó.

D tancs [m]	4,409
D entre tancs [m]	2,204
N	1
Àrea ocupada [m ²]	15,27
Dp [m]	1
L cubeta [m]	3,102
W cubeta [m]	13,02
A lliure [m ²]	25,13
h cubeta [m]	5,211

11.1.15 Tanc de condensats de MA

La finalitat del tanc de condensats del MA és emmagatzemar temporalment els condensats que surten de la primera columna de destil·lació, en aquest cas serà MA condensat.

11.1.15.1 Disseny mecànic del tanc de condensats de MA

Pel seu disseny s'utilitza el codi ASME i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11.14.- Resultats obtinguts del disseny del tanc de condensats de MA.

Nº tancs	1	D [m]	0,9528
Temps stock [dies]	1	H cilindre [m]	1,420
Pressió [kPa]	40	H líquid [m]	1,136
Pressió disseny [psi]	8,858	H total [m]	1,811
Volum disseny [m ³]	1,0	COS CILÍNDRIC	
ΔP [psi]	1,901	t [mm]	3
Temperatura [°C]	100	Pes [kg]	101,2
Temperatura disseny [°C]	115	CAPÇAL TORIESFÈRIC	
densitat fluid emmagatzemat [kg/m ³]	1176	L = D [in]	37,51
Material	AISI 316L	r [in]	3,751
densitat material [kg/m ³]	7960	L/r	10
S [psi]	15700	M	1,54
E	0,85	t [mm]	3
C1 [mm] / 20 anys	2	H toriesfèric [m]	0,1953
C2 [mm] / 20 anys	0,2314	Ocupació del tanc [%]	80
Pes total tanc buit [kg]		122,1	
Pes total tanc omplert [kg]		783,4	

11.1.15.2 Cubeta del tanc de condensats de MA

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.15.- Resultats del dimensionament de la cubeta del tanc de condensats de MA.

D tancs [m]	0,9528
D entre tancs [m]	0,4764
N	1
Àrea ocupada [m ²]	0,7131
Dp [m]	1
L cubeta [m]	2,238
W cubeta [m]	4,382

A lliure [m ²]	9,095
h cubeta [m]	0,1441

11.1.16 Tanc de condensats de PA

La finalitat del tanc de condensats del PA és emmagatzemar temporalment els condensats que surten de la primera columna de destil·lació, en aquest cas serà MA condensat.

11.1.16.1 Disseny mecànic de condensats de PA

Pel seu disseny s'utilitza el codi ASME i es segueix el procediment explicat amb anterioritat. Per la construcció del tanc es fa servir l'acer inoxidable AISI 316L. Els resultats obtinguts es presenten a la taula següent:

Taula 11.16.- Resultats obtinguts del disseny del condensats de PA.

Nº tancs	1	D [m]	1,625
Temps stock [dies]	1	H cilindre [m]	2,429
Pressió [kPa]	10	H líquid [m]	1,943
Pressió disseny [psi]	5,327	H total [m]	3,079
Volum disseny [m ³]	5,0	COS CILÍNDRIC	
ΔP [psi]	3,182	t [mm]	3,0
Temperatura [°C]	150	Pes [Kg]	295,5
Temperatura disseny [°C]	165	CAPÇAL TORIESFÈRIC	
densitat fluid emmagatzemat [kg/m ³]	1151	L = D [in]	63,98
Material	AISI 316L	r [in]	6,398
densitat material [kg/m ³]	7960	L/r	10
S [psi]	15700	M	1,54
E	0,85	t [mm]	3,0
C1 [mm] / 20 anys	2	H toriesfèric [m]	0,3254
C2 [mm] / 20 anys	0,2323	Ocupació del tanc [%]	80
Pes total tanc buit [kg]		356,5	
Pes total tanc omplert [kg]		3608	

11.1.16.2 Cubeta del tanc de condensats de PA

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.17.- Resultats del dimensionament del tanc de condensats de PA.

D tancs [m]	1,625
D entre tancs [m]	0,8125
N	1

Àrea ocupada [m ²]	2,074
Dp [m]	1
L cubeta [m]	2,406
W cubeta [m]	6,063
A lliure [m ²]	12,51
h cubeta [m]	0,5233

11.1.17 Tanc per a la sal

Amb l'objectiu d'emmagatzemar la sal durant les parades, s'instal·la un tanc a l'àrea de serveis.

Taula 11.18.- Resultats obtinguts del disseny del tanc de sal fosa.

Nº tancs	1	D [m]	1,819
Temps stock [dies]	0	H cilindre [m]	2,717
Pressió [kPa]	101,3	H líquid [m]	2,174
Pressió disseny [psi]	23,65	H total [m]	3,458
Volum disseny [m ³]	7,0	COS CILÍNDRIC	
ΔP [psi]	5,873	t [mm]	4,0
Temperatura [°C]	350	Pes [Kg]	493,3
Temperatura disseny [°C]	365	CAPÇAL TORIESFÈRIC	
densitat fluid emmagatzemat [kg/m ³]	1899	L = D [in]	71,62
Material	AISI 316L	r [in]	7,162
densitat material [kg/m ³]	7960	L/r	10
S [psi]	15700	M	1,54
E	0,85	t [mm]	5,0
C1 [mm] / 20 anys	2	H toriesfèric [m]	0,3707
C2 [mm] / 20 anys	0,3607	Ocupació del tanc [%]	80
Pes total tanc buit [kg]		595,2	
Pes total tanc omplert [kg]		8096	

11.1.17.1 Cubeta del tanc d'emmagatzematge de sal fosa

Per determinar les dimensions que ha de tenir la cubeta del tanc d'anhídrid maleic s'utilitzen les equacions exposades a l'apartat 11.1.5 Cubetes. Tot seguit es detallen els resultats.

Taula 11.19.- Resultats del dimensionament del tanc de sal fosa.

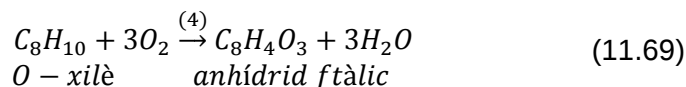
D tancs [m]	1,819
D entre tancs [m]	0,9096
N	1
Àrea ocupada [m ²]	2,599
Dp [m]	1
L cubeta [m]	2,455
W cubeta [m]	6,548
A lliure [m ²]	13,47
h cubeta [m]	0,6805

11.2 Reactor

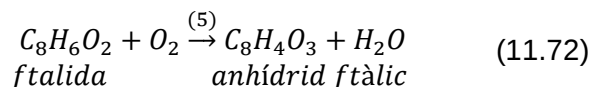
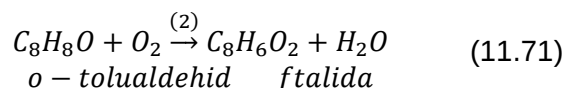
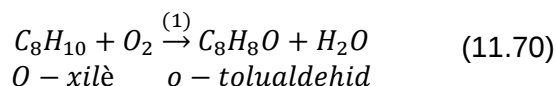
La producció d'anhídrid ftàlic a nivell industrial, es fa mitjançant una oxidació catalítica a partir de dos hidrocarburs: l'o-xilè o el naftalè. En el nostre cas d'estudi l'oxidació es farà emprant l'o-xilè com a reactiu limitant, en una reacció en fase gas per tal d'obtenir una producció de 30000 Tn/any.

11.2.1 Disseny teòric

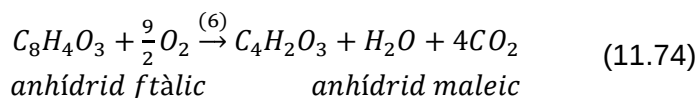
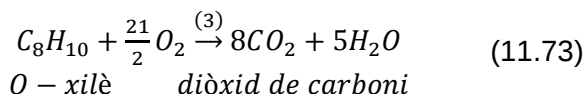
Per poder fer el disseny del reactor s'ha de tenir en compte les reaccions que es produeixen dins d'ell. La reacció general per la producció de l'anhídrid ftàlic és la següent:



L'equació 11.70 és la reacció general de formació del producte d'interès, però també hi ha un altre que forma el producte a partir d'una reacció seqüencial:



A més de la reacció d'interès es produeixen altres reaccions no desitjades que formen productes on més tard s'hauran de separar de l'anhídrid ftàlic.



Els articles on s'ha extret les reaccions que forma l'oxidació de l'o-xilè i els valors dels paràmetres cinètics, incloent les equacions de velocitat: *Effect of kinetic models on hot spot temperature prediction for phthalic anhydride production in a multitubular packed bed reactor*. By G.A Orozco, J.R Gomez, O.F Sanchez, I.D Gil and A. Duran i *The prediction of the performance of packed-bed catalytic reactor in the air-oxidation of o-xylene*. By P.H Calderbank, K. Chandrasekharan and C. Fumagalli.

La reacció d'oxidació s'ha de duu a terme en fase gas i en presència d'un catalitzador en unes condicions específiques, ja que totes dues substàncies són estables en condicions normals. El catalitzador que s'utilitza és el pentaòxid de divanadi (V_2O_5) sobre òxid de titani (TiO_2).

Un cop s'han definit les reaccions que es donen i la selecció del catalitzador, es tria el tipus de reactor. Segons els documents estudiats hi ha dues maneres que duu a terme la reacció d'oxidació, en un reactor tipus flux pistó de llit fluïditzat o un reactor multitubular amb llit fix. L'escollit és el reactor multitubular de llit fix, és a dir, el reactor consta d'una sèrie de tubs on aquests estan empaquetats amb el catalitzador en un 60% del volum del tub, fent que el volum útil sigui el 40%. Els tubs actuen cadascun com un reactor, aquests estan envoltats per una carcassa on en l'espai que queda entre el tub i la carcassa hi passa el fluid refrigerant.

El següent pas es fixar els paràmetres d'operació del reactor, la temperatura de treball serà a 360°C i a una pressió de 3 bar. La cinètica de la reacció varia amb la temperatura llavors s'ha de deixar els paràmetres en funció de la temperatura, per això es fa servir l'equació d'Arrhenius:

$$k_{(T)} = Ae^{(-E/RT)} \quad (11.75)$$

On $k_{(T)}$ és la constant cinètica a una temperatura determinada.

A és el factor preexponencial [$\text{kmol/kg}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$]

E és l'energia d'activació de la reacció [kJ/kmol].

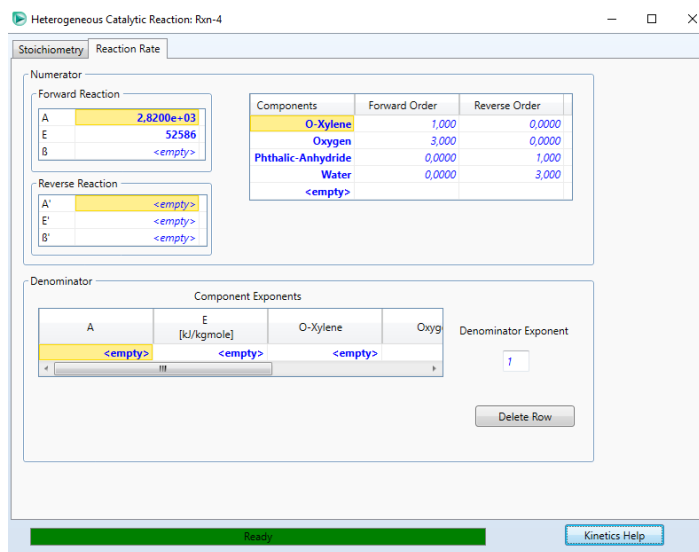
R és la constant de la llei dels gasos ideals [$\text{J/K}\cdot\text{mol}$].

T és la temperatura [$^\circ\text{C}$]

Taula 11.20: Valors dels paràmetres de l'equació d'Arrhenius.

E1 [kJ/kmol]	69417	A1 [kmol/m³·s]	8,26E+03
E2 [kJ/kmol]	46473	A2 [kmol/m³·s]	1,28E+03
E3 [kJ/kmol]	56312	A3 [kmol/m³·s]	7,67E+02
E4 [kJ/kmol]	52586	A4 [kmol/m³·s]	2,82E+03
E5 [kJ/kmol]	38519	A5 [kmol/m³·s]	6,91E+03

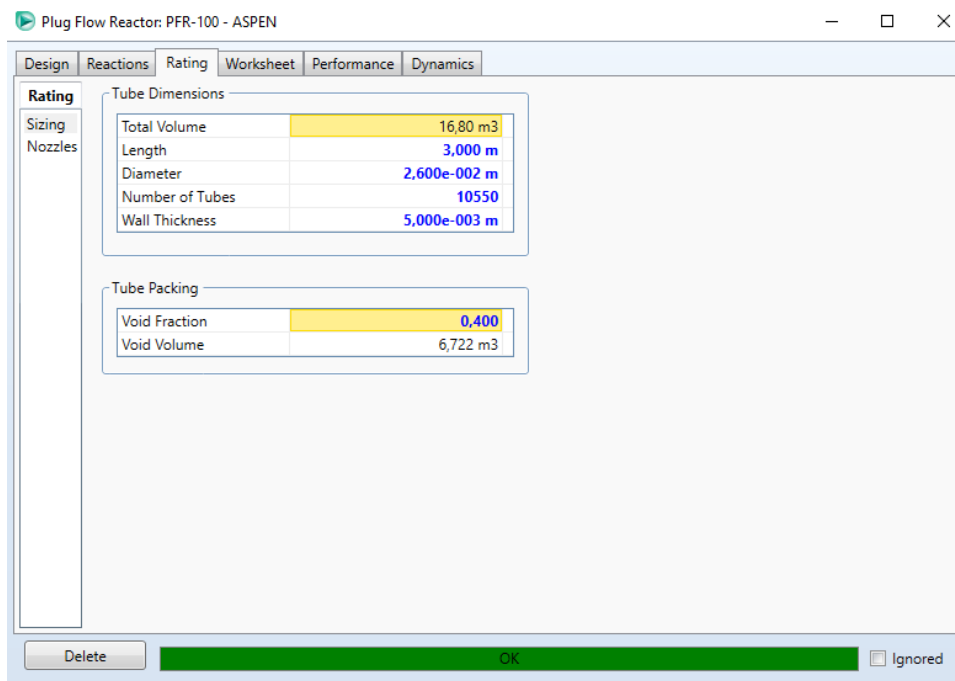
A continuació, s'introdueix totes les dades al simulador Aspen Hysys V8.0. En el programa es dissenya com un reactor de flux pistó, en ell s'introdueixen les característiques del corrent d'entrada i sortida, les condicions d'operació, els paràmetres cinètics i les característiques dels tubs del reactor.



Components	Forward Order	Reverse Order
O-Xylene	1,000	0,0000
Oxygen	3,000	0,0000
Phthalic-Anhydride	0,0000	1,000
Water	0,0000	3,000
<empty>		

Figura 11.5: Paràmetres cinètics per la reacció general de l'anhídrid ftàlic.

Seguidament en les figures següents es presenten els resultats obtinguts de mitjançant la simulació: la primera mostra les característiques del reactor i l'altre els resultats del corrent d'entrada i de sortida:

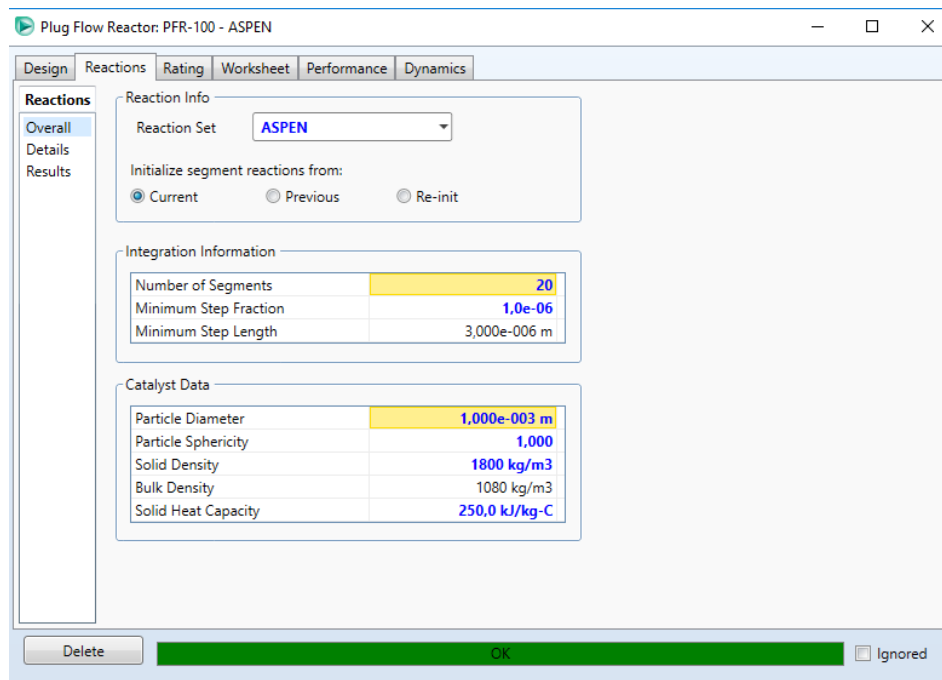


Tube Dimensions	
Total Volume	16.80 m3
Length	3,000 m
Diameter	2,600e-002 m
Number of Tubes	10550
Wall Thickness	5,000e-003 m

Tube Packing	
Void Fraction	0,400
Void Volume	6,722 m3

Figura 11.6: Característiques físiques del reactor.

A la figura 11.22 es mostren els valors de les característiques físiques del reactor, que han estat escollides per la patent.



Plug Flow Reactor: PFR-100 - ASPEN

Design Reactions Rating Worksheet Performance Dynamics

Reactions

Overall
Details
Results

Reaction Info

Reaction Set: ASPEN

Initialize segment reactions from:

☒ Current ☐ Previous ☐ Re-init

Integration Information

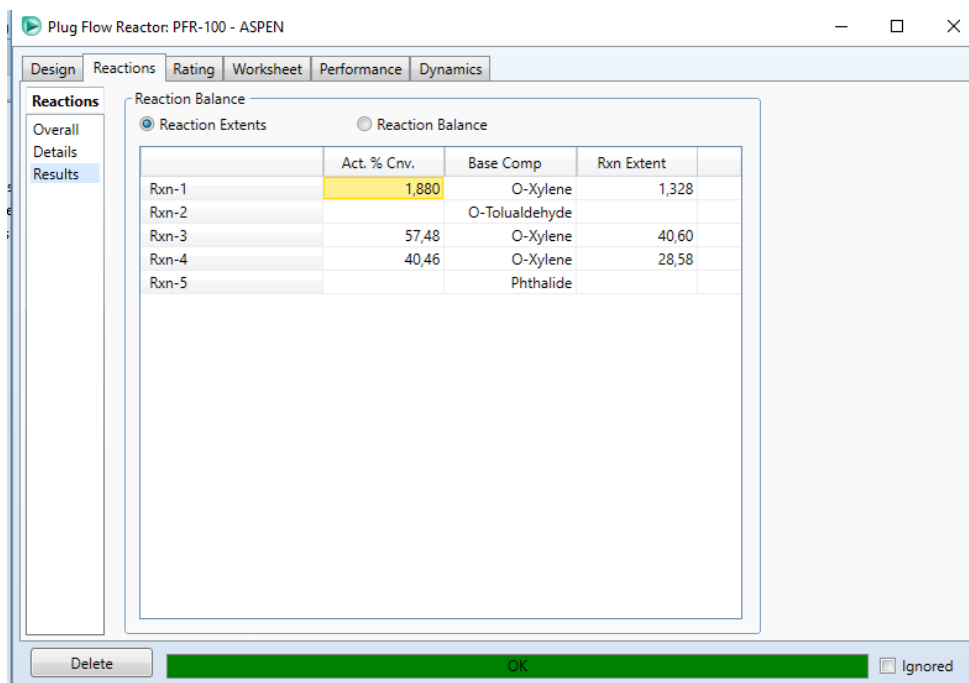
Number of Segments	20
Minimum Step Fraction	1,0e-06
Minimum Step Length	3,000e-006 m

Catalyst Data

Particle Diameter	1,000e-003 m
Particle Sphericity	1,000
Solid Density	1800 kg/m3
Bulk Density	1080 kg/m3
Solid Heat Capacity	250,0 kJ/kg-C

Delete OK Ignored

Figura 11.7: Característiques del catalitzador.



Plug Flow Reactor: PFR-100 - ASPEN

Design Reactions Rating Worksheet Performance Dynamics

Reactions

Overall
Details
Results

Reaction Balance

☒ Reaction Extents ☐ Reaction Balance

	Act. % Cnv.	Base Comp	Rxn Extent
Rxn-1	1,880	O-Xylene	1,328
Rxn-2		O-Tolualdehyde	
Rxn-3	57,48	O-Xylene	40,60
Rxn-4	40,46	O-Xylene	28,58
Rxn-5		Phthalide	

Delete OK Ignored

Figura 11.8: Conversió.

Plug Flow Reactor: PFR-100 - ASPEN

Worksheet	Name	7	8	E5
Conditions	Vapour	1,0000	1,0000	<empty>
Properties	Temperature [C]	250,0	360,0	<empty>
Composition	Pressure [kPa]	304,0	244,0	<empty>
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	4620	4681	<empty>
	Mass Flow [kg/h]	1,388e+005	1,387e+005	<empty>
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	252,1	242,1	<empty>
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	7433	-3,414e+004	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	8,244	19,33	<empty>
	Heat Flow [kJ/h]	3,434e+007	-1,598e+008	1,942e+008

Delete OK Ignored

Figura 11.9: Resultats dels corrent d'entrada i sortida del reactor.

El volum obtingut per el simulador és 16.8 m³, on el volum útil del reactor és 6,7 m³, ja que un percentatge en volum està ocupat per el catalitzador com s'ha esmentat anteriorment. El volum bé fixat per el programa només encapsa els tubs, sense tenir en compte la carcassa i els capsals.

Les reaccions que ocorren dins del reactor són exotèrmiques. El problema que esdevé es la temperatura òptima que requereixen les reaccions és de 360°C, per tant la temperatura d'entrada al reactor està per sota de la temperatura desitjada, per a que amb l'energia que s'allibera es pugui assolir la temperatura, i després mantenir-la. Mitjançant la simulació al HYSYS ens dona que el flux d'energia és 1,942·10⁸ kJ/h.

La conversió assolida en el reactor és 57,48%, és una conversió baixa però s'ha de tenir en compte que es produeixen productes no desitjats.

11.2.2 Disseny mecànic del reactor

Després de realitzar el disseny teòric del reactor, cal fer un disseny mecànic on el material del tanc sigui resistent a les condicions d'operació, en aquest cas a 360°C i 3 bar de pressió.

Primerament, el material més adequat per a construir la carcassa i els tubs del reactor és l'acer inoxidable 316L, ja que és un material resistent per a temperatures altes com en aquest cas. El material és una aliatge que es compon de crom, níquel i molibdè.

Un cop escollit el material de construcció del reactor, cal procedir a fer el càlcul del gruix de l'equip mitjançant la norma ASME, com s'ha explicat rigorosament en l'apartat de disseny de tancs a pressió. Cal tenir en compte que el reactor consta d'un cos amb dos capsals torisfèrics i els tubs del reactor. En la taula 11.25 es presenten els resultats obtinguts del gruix de cada part:

Taula 11.21: Condicions i resultats per a les diferents parts del reactor.

Tubs		Carcassa		Capçal torisfèric	
Poperació [bar]	3	Poperació [bar]	1,5	L [mm]	3065,6
Pdisseny [bar]	3,45	Pdisseny [bar]	2,3	r [mm]	306,8
Tdisseny [°C]	375	Tdisseny [°C]	410	L/r	9,99
Toperació [°C]	360	Toperació [°C]	395	M	1,54
Diàmetre [mm]	26	Diàmetre(mm)	3,0656	h [mm]	518,1
Longitud [mm]	3000	Longitud(mm)	3000	t gruix [cm]	2,7
t [cm]	0,5	t [cm]	3	tgruix+ t corrosió [cm]	3

Cal recalcar que els capsals treballen a 3 bars de pressió, ja que el fluid reactiu entra per sota del capçal introduint-se després en els tubs.

Els resultats obtinguts en cada part són 5 mm de gruix per als tubs, 5 cm el cos del reactor i 2 cm per als capsals. Una vegada es té la mesura del gruix de cada part es procedeix a determinar el pes del reactor:

$$M_{tubs} = (V_{ext} - V_{int})\rho_{AISI\ 316L} \quad (11.76)$$

$$M_{cos} = (V_{ext} - V_{int})\rho_{AISI\ 316L} \quad (11.77)$$

$$M_{capsals} = (V_{ext} - V_{int})\rho_{AISI\ 316L} \quad (11.78)$$

On V_{ext} és el volum exterior [m³].

V_{int} és el volum calculat amb el diàmetre interior [m³].

$\rho_{AISI\ 316L}$ és la densitat del material 7960 kg/m³.

Els resultats obtinguts es presenten a continuació a la taula 11.26, és el pes del reactor buit:

Taula 11.22: Pes de cada part del reactor.

	TUBS	COS	CAPSAL
Pes unitat [kg]	12	13050,8	860
nº de peces	10550	1	2
Pes total [kg]	126675,7	13050,8	1720
Pes total equip buit [kg]		141447	

Per calcular el pes del reactor en operació, s'ha de tenir en compte que una fracció de volum dels tubs està plena de catalitzador. A continuació es determina el pes d'operació:

Taula 11.23: Fracció de volum ocupat.

TUB	
	% volum ocupat
Catalitzador	60
Mescla reactor	40

$$V_{catalitzador} = V_{1\ tub} \cdot 0.60 = 0.0016 \cdot 0.60 = 0.00095\ m^3 \quad (11.79)$$

$$V_{mescla} = V_{1\ tub} \cdot 0.40 = 0.0016 \cdot 0.40 = 0.00064\ m^3 \quad (11.80)$$

$$PES_{catalitzador} = V_{catalitzador} \cdot N_{tubs} \cdot \rho_{catalitzador} \quad (11.81)$$

$$PES_{catalitzador} = 0.00095\ \frac{m^3}{tubs} \cdot 10550\ tubs \cdot 1800\ \frac{kg\ cat}{m^3} = 18135.4\ kg$$

$$PES_{mescla} = V_{mescla} \cdot N_{tubs} \cdot \rho_{mescla} \quad (11.82)$$

$$PES_{mescla\ tubs} = 0.000637\ \frac{m^3}{tubs} \cdot 10550\ tubs \cdot 1,54\ \frac{kg\ mescla}{m^3} = 10.35\ kg$$

$$PES_{mescla\ capsal} = 2 \cdot V_{capsal} \cdot N_{tubs} \cdot \rho_{mescla} \quad (11.83)$$

$$PES_{mescla\ capsal} = 2\ capsals \cdot 2.33\ \frac{m^3}{capsal} \cdot 1,54\ \frac{kg\ mescla}{m^3} = 7.176\ kg$$

Després de fer el càlcul del pes en operació dins dels tubs i els capçals, s'ha de calcular el pes de la sal dins del reactor:

$$PES_{sal} = (V_{total} - V_{tubs}) \cdot \rho_{sal} \quad (11.84)$$

$$PES_{sal} = (22.14 - 16,80)\ m^3 \cdot 1835.6\ \frac{kg\ sal}{m^3} = 9802.14\ kg$$

$$PES_{operacio\ total} = PES_{reactor\ ple} + PES_{reactor\ buit} \quad (11.85)$$

$$PES_{operacio\ total} = 9802.10 + 18152.97 + 14770 + 141447 = 170872 \text{ kg totals}$$

11.2.3 Tractament tèrmic del rector

El reactor s'ha dissenyat perquè treballi a una temperatura de 360°C, per tant s'ha de dissenyar un sistema que mantingui dita temperatura. El sistema escollit és similar a un bescanviador de tubs i carcassa, ja el reactor és un flux pistó multitubular. Mitjançant el simulador HYSYS ens dóna el flux de calor que s'ha de subministrar al reactor i perquè hi treballi a la temperatura de 360°C, el valor del flux de calor és $1,942 \cdot 10^8$ kJ/h.

En primer lloc s'ha d'escollir un fluid refrigerant que pugui treballar segons les necessitats. En aquest cas el fluid és una sal que presenta les següents característiques:

Taula 11.24: Característiques de la sal fosa.

Molten salt¹	
	Composició, %
NaNO ₃	60
KNO ₃	40
ρ [kg/m ³] a 300°C	1899
C_p [J/kg·K] a 300°C	1495
k [W/m K] a 300°C	0,500
T fusió [°C]	221
T congelació [°C]	238

La sal fosa escollida pot treballar en un rang de temperatures de 260 °C fins a 550 °C, en el qual el reactor en operació està a 360°C.

Seguidament, s'ha de calcular el caudal de refrigerant necessari per extreure dita calor amb la següent equació:

$$Q = C_p \cdot m \cdot (\Delta T) \quad (11.86)$$

$$m_{sal} = \frac{Q}{C_p \cdot (\Delta T)}$$

$$m_{sal} = \frac{5.39 \cdot 10^{+7}}{382.5 \cdot (395 - 370)} = 5641.24 \text{ kg/s}$$

¹ http://www.archimedesolarenergy.it/molten_salt.htm,. Propietats de la sal fosa, NaNO₃ al 60% i KNO₃ al 40%.

El resultat obtingut per al caudal màssic de refrigerant és 4967 kg/s. Seguidament, per fer obtenir el valor del coeficient global de bescanvi de calor, s'utilitza l'equació de transferència d'energia:

$$q = AU(\Delta TML) \quad (11.87)$$

Per poder calcular el valor de U, s'ha de resoldre els altres paràmetres de l'equació:

- Àrea de bescanvi

El primer paràmetre que es troba a l'equació és l'àrea de bescanvi que es calcula a partir de l'equació 11.88:

$$A_{tub} = L \cdot \pi \cdot D_{extern} \quad (11.88)$$

On L és la longitud del tub [m].

D_{extern} és el diàmetre extern del tub [m].

$$A_{tub} = 3 \cdot \pi \cdot 0.0363 = 0.342 \text{ m}^2 \quad (11.89)$$

$$A_{tot} = A_{tub} \cdot N_{tubs} \quad (11.90)$$

$$A_{tot} = 0.342 \cdot 10550 = 3606,37 \text{ m}^2$$

- Increment de temperatura mitjana logarítmica ΔTML

Per al càlcul de la mitjana de la temperatura s'ha de tenir en compte els perfils que es mostren a la figura 11.25:

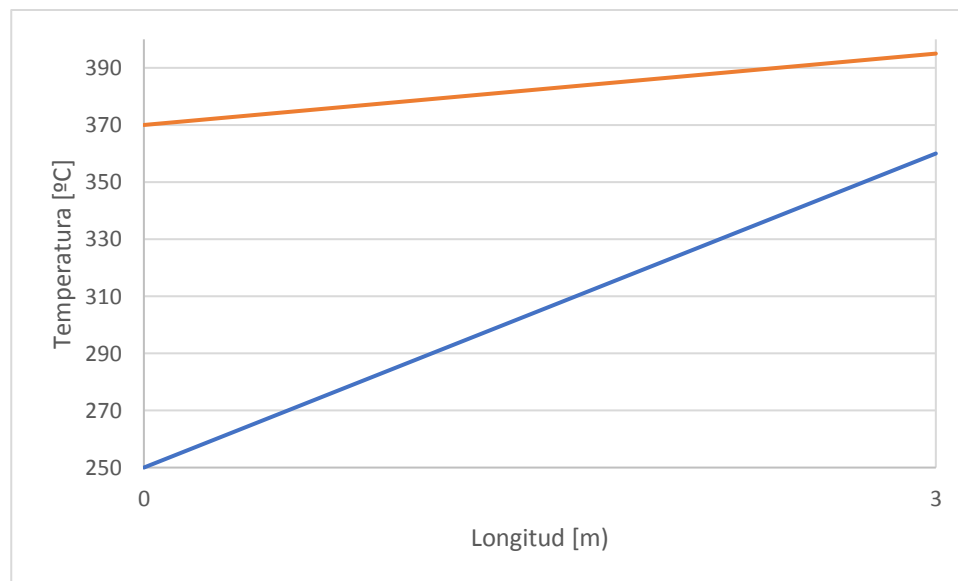


Figura 11.25: Perfil de temperatura.

Tenint en compte el perfil de temperatura i que els fluids circulen en contra corrent, ΔT_{ML} es calcula com:

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(395 - 250) - (370 - 360)}{\ln \frac{(395 - 250)}{(370 - 360)}} = 50,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Coeficient de transferència de calor global

Un cop s'ha calculat l'àrea de bescanvi i l'increment de temperatura, apliquem l'equació 11.xx per calcular el coeficient global de bescanvi de calor:

$$U = \frac{Q}{A(\Delta T_{ML})} \quad (11.91)$$

$$U = \frac{5.39 \cdot 10^7}{3606,37 \cdot 50,5} = 295,9 \text{ } W/m^2 \cdot K$$

11.3 BESCANVIADORS

En aquest apartat es resumeixen els paràmetres principals a tenir en compte per dissenyar un bescanviador.

En la planta de producció de l'anhídrid ftàlic es necessiten diferents tipus de bescanviadors segons la seva funció. Principalment, es poden distingir en dos grups: bescanviadors on es produeix un canvi de fase i els que no.

La majoria de bescanviadors utilitzats a la planta són de tipus carcassa i tubs, ja que són els més comuns a la indústria química, i a més presenten una sèrie d'avantatges: el disseny dels bescanviadors i el manteniment i neteja de l'equip són senzills, i també són molt més econòmics que altre tipus de bescanviadors. Els bescanviador de carcassa i tubs els podem classificar en quatre grans grups:

1. Bescanviadors calefactors .
2. Bescanviadors refrigerants.
3. *Reboilers (Kettle)*.
4. Condensadors.

Els bescanviadors 1 i 2, no presenten cap tipus de canvi de fase en el fluid que hi circula a l'interior, en canvi els *reboilers* i condensadors, són bescanviadors que presenten un canvi de fase en el fluid, passa de líquid a gas, i en l'altre de gas a líquid respectivament.

11.3.1 Disseny dels bescanviadors

Tots els bescanviadors que hi trobem a la planta, s'han dissenyat amb el programa *Aspen Exchanger Desing and Rating*. El programa *Aspen* utilitza el codi ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), i el codi TEMA, que faciliten el disseny rigorós del bescanviador i l'obtenció dels paràmetres més importants del bescanviadors. També, el programa calcula el preu aproximat del bescanviador, el qual s'utilitzarà en l'apartat d'avaluació econòmica.

11.3.1.1 Càlculs previs al disseny

Abans de començar amb el disseny dels bescanviadors amb el programa, cal fer una sèrie de càlculs previs per introduir-los en el programa. Bàsicament és fa el balanç d'energia per obtenir els paràmetres claus pel disseny.

- Bescanviadors sense canvi de fase

Per als bescanviadors que no presenten canvi de fase, utilitzem l'equació següent:

$$Q_q = m_1 C_{p1} (t_2 - t_1) = m_2 C_{p2} (T_1 - T_2) \quad (11.92)$$

On els subíndex u representa al fluid que circula per carcassa i el dos, el fluid que passa pels tubs.

m és el cabal màssic del fluid que passa per carcassa, en kg/h .

C_p és el calor específic del fluid, en $kJ/kg\ ^\circ C$

t_s i T_s són les temperatures de sortida, en $^\circ C$.

t_e i T_e entrada del fluid que passa per carcassa i per tubs, en $^\circ C$.

Q_q és el flux de calor, expressat en kJ/h .

A continuació es presenten les taules amb les dades prèvies de cada bescanviador.

Taula 11.25: Dades prèvies al disseny de E-201.

	TUBS		CARCASSA	
	THEO-VP1		AIRE	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
$m(kg/h)$	69132		131000	
$T(^\circ C)$	380	200	45,31	250
$C_p(kJ/kg\ ^\circ C)$	2,154	2,313	1,015	1,058

Cp_{media}	2,234	1,037
Q(kJ/h)	2,78E+07	2,78E+07

Els bescanviadors E-201 és l'encarregat de preescalfar l'aire que posteriorment serà introduït al reactor amb el reactiu limitant.

Taula 11.26: Dades prèvies al disseny de E-202.

	TUBS		CARCASSA	
	PRODUCTES		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	1,40E+05		57471	
T(°C)	360	260	100	235
Cp(kJ/kg °C)	1,139	1,107	1,895	2,152
Cp_{media}	1,123		2,0235	
Q(kJ/h)	1,57E+07		1,57E+07	

Taula 11.27: Dades prèvies al disseny de E-203.

	TUBS		CARCASSA	
	PRODUCTES		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	1,40E+05		55577,6	
T(°C)	260	160	100	235
Cp(kJ/kg °C)	1,116	1,056	1,895	2,152
Cp_{media}	1,086		2,024	
Q(kJ/h)	1,52E+07		1,52E+07	

Els bescanviadors E-202 i E-203 són els responsables de refredar la mescla de productes que surt del reactor a 360°C.

Taula 11.28: Dades prèvies al disseny de E-301.

	Tubs		Carcassa	
	PRODUCTES		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	5057		1962,5	
T(°C)	260	150	100	235
Cp(kJ/kg °C)	0,908	1,02	1,895	2,152
Cp_M(kJ/kg °C)	0,964		2,024	
Q(kJ/h)	5,36E+05		5,36E+05	

- Bescanviadors amb canvi de fase

Per dissenyar els bescanviadors que presenten un canvi de fase, s'aplica l'equació del balanç d'energia amb el terme de canvi de fase:

$$Q_q = m_1 C_{p1} (t_s - t_e) = m_2 C_{p2} (T_e - T_s) + m_2 \lambda \quad (11.93)$$

On λ és la calor latent del fluid que presenta el canvi de fase, en kJ/kg .

El bescanviador en la línia principal que presenta un canvi de fase és E-201, que té com a objectiu evaporar l'o-xilè. A continuació es presenta la taula amb les dades prèvies al disseny:

Taula 11.29: Dades prèvies al disseny de RB-201.

	CARCASSA		TUBS	
	O-xilen		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	7500		8647,8	
T(°C)	25	250	380	200
Cp(kJ/kg °C)	1,763	2,033	2,154	2,313
Cpmedia	1,898		2,234	
Q(kJ/h)	5,68E+06		3,48E+06	
λ (kJ/kg)	346,2	315,1	255	255,2
λM (kJ/kg)	330,7		255,1	

Taula 11.30: Dades prèvies al disseny de E-302.

	Tubs		Carcassa	
	PRODUCTS		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	72		2612	
T(°C)	260	136	100	150
Cp(kJ/kg °C)	1,950	1,963	1,895	1,562
CpM(kJ/kg °C)	1,957		1,729	
Q(kJ/h)	2,26E+05		2,26E+05	
λ (kJ/kg)	2892	2893	-	-
λM (kJ/kg)	2892,5		-	-

Taula 11.31: Dades prèvies al disseny de E-303.

	Tubs		Carcassa	
	PRODUCTS		THEO-VP1	

	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	72		2941	
T(°C)	136	60	50	100
Cp(kJ/kg °C)	1,950	3,953	1,159	1,895
CpM(kJ/kg °C)	2,952		1,527	
Q(kJ/h)	2,25E+05		2,25E+05	
λ(kJ/kg)	2894	2895	-	-
λM(kJ/kg)	2894,5		-	-

Taula 11.32: Dades prèvies al disseny de RB-301.

	TUBS		CARCASSA	
	MA/PA/HV		THEO-VP1	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	4735		5305	
T(°C)	254,5	277,9	380	308,8
Cp(kJ/kg °C)	0,9493	0,4192	2,154	2,313
Cpmedia	0,684		2,23	
Q(kJ/h)	2,20E+06		2,20E+06	
λ(kJ/kg)	408	488	255	255,2
λM(kJ/kg)	448		255,1	

Taula 11.33: Dades prèvies al disseny de E-304.

	TUBS		CARCASSA	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	321,9		3000,0	
T(°C)	168,9	100	50	120
Cp(kJ/kg °C)	2,14	2,004	1,283	1,388
Cpmedia	2,072		1,3355	
Q(kJ/h)	361465		2,80E+05	
λ(kJ/kg)	980	980,3	-	-
λM(kJ/kg)	980,15		-	

Taula 11.34: Dades prèvies al disseny de RB-302.

	TUBS		CARCASSA	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	215,1		146,8	

T(°C)	258	355	380	200
Cp(kJ/kg °C)	2,488	2,818	2,154	2,313
Cpmedia	2,653		2,234	
Q(kJ/h)	103020,2091		6,56E+04	
λ(kJ/kg)	221,6	221,6	255	255,2
λM(kJ/kg)	221,6		255,1	

Taula 11.35: Dades prèvies al disseny de E-305.

	TUBS		CARCASSA	
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida
m(kg/h)	4520		13330,5	
T(°C)	196,8	150	80	170
Cp(kJ/kg °C)	1,106	0,9503	1,283	1,388
Cpmedia	1,02815		1,3355	
Q(kJ/h)	1,60E+06		1,60E+06	
λ(kJ/kg)	402,6	402,6	-	-
λM(kJ/kg)	402,6		-	

11.3.1.2 Localització del fluid

Un dels aspectes més importants en el disseny d'un bescanviador de tubs i carcassa, és la localització del fluid, és a dir, escollir quin d'ells circularà per carcassa quin per tubs. Per poder escollir hi ha una sèrie d'indicacions que s'han de seguir:

- Per tubs, circularan els fluid més tòxics i corrosius, així com els que siguin més nets(degut a la dificultat de neteja d'aquests). Els fluid amb una pressió i temperatura elevada també ho farà, ja que el cost energètic serà menor.

- Per carcassa, circularan els fluids més viscosos i bruts, ja que la neteja de la carcassa és més senzilla. Si tenim vapors que no condensen, circularan pels tubs de manera que no s'acumulin.

- Els caudals elevats de vapor circularan per carcassa, perquè tenen més espai disponible.

11.3.1.3 Aspen Exchanger Desing and Rating

- **Pas 0. Elecció del tipus de bescanviador i aspectes del programa més importants.**

A l'iniciar el programa *Aspen Exchanger Design and Rating*, apareix una finestra on presenta els diferents tipus de bescanviadors que hi ha per dissenyar, tal com mostra la figura 11.11:

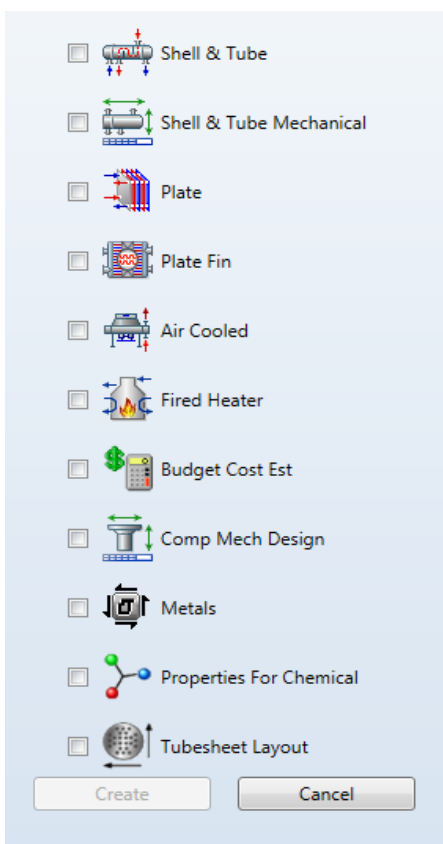


Figura 11.11: Opcions de disseny del programa.

A continuació escollim l'opció *Shell and tub exchanger*: el bescanviador de tubs i carcassa, com s'ha esmentat anteriorment per els avantatges que presenta.

Seguidament, es mostren una sèrie d'apartats que corresponen a les característiques importants del programa on s'ha d'anar emplenat amb les dades del procés per un correcte disseny. A la figura següent es mostren tots els aspectes del programa, i els més important subratllats:

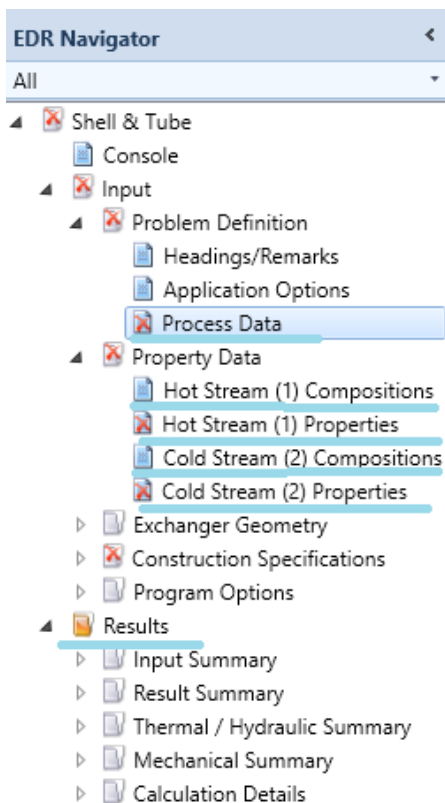
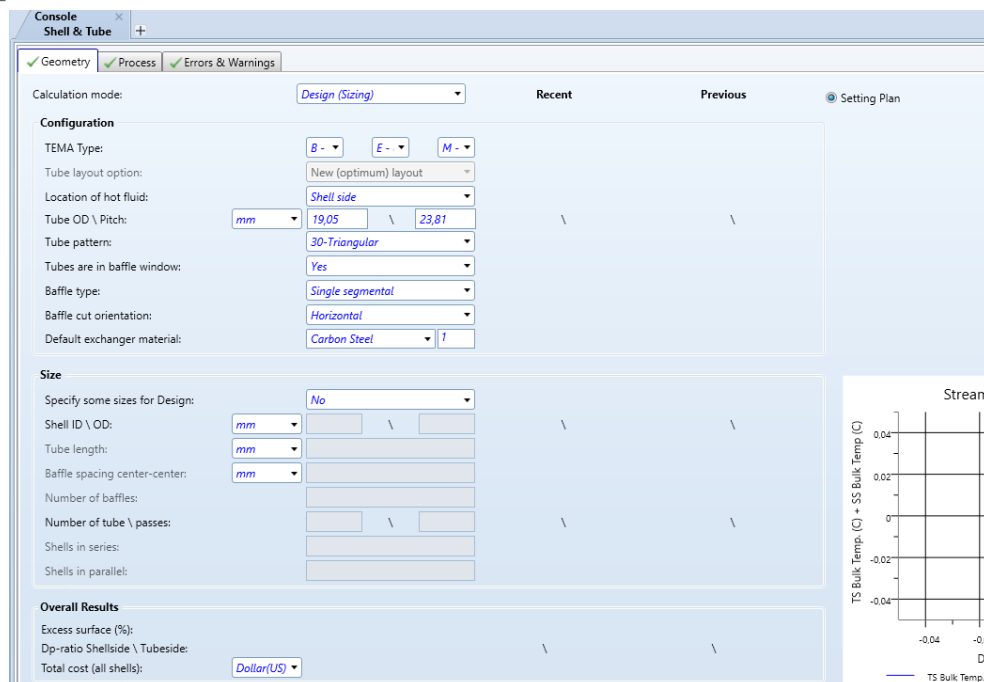


Figura 11.12: Apartats del programa .

- **Pas 1. Introducció de dades a 'console'.**

El primer pas a seguir és la introducció de les dades generals del bescanviador. En la figura 11.13 es veuen les dades a emplenar:



The screenshot shows the PHthal Shell & Tube console interface. It is divided into several sections:

- Calculation mode:** Set to "Design (Sizing)".
- Configuration:**
 - TEMA Type: B - E - M -
 - Tube layout option: New (optimum) layout
 - Location of hot fluid: Shell side
 - Tube OD \ Pitch: mm 19,05 \ 23,81
 - Tube pattern: 30-Triangular
 - Tubes are in baffle window: Yes
 - Baffle type: Single segmental
 - Baffle cut orientation: Horizontal
 - Default exchanger material: Carbon Steel 1
- Size:**
 - Specify some sizes for Design: No
 - Shell ID \ OD: mm
 - Tube length: mm
 - Baffle spacing center-center: mm
 - Number of baffles:
 - Number of tube \ passes:
 - Shells in series:
 - Shells in parallel:
- Overall Results:**
 - Excess surface (%):
 - Dp-ratio Shellside \ Tubeside:
 - Total cost (all shells): Dollar(US)

On the right side, there is a graph titled "Stream" showing "TS Bulk Temp. (C) + SS Bulk Temp. (C)" on the y-axis (ranging from -0.04 to 0.04) and "D" on the x-axis. A legend indicates "TS Bulk Temp." with a blue line.

Figura 11.13: Console .

La primera característica a modificar és el TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*), on s'escull la configuració de la carcassa del bescanviador. A continuació en la figura 11.14 es presenten els diferents tipus:

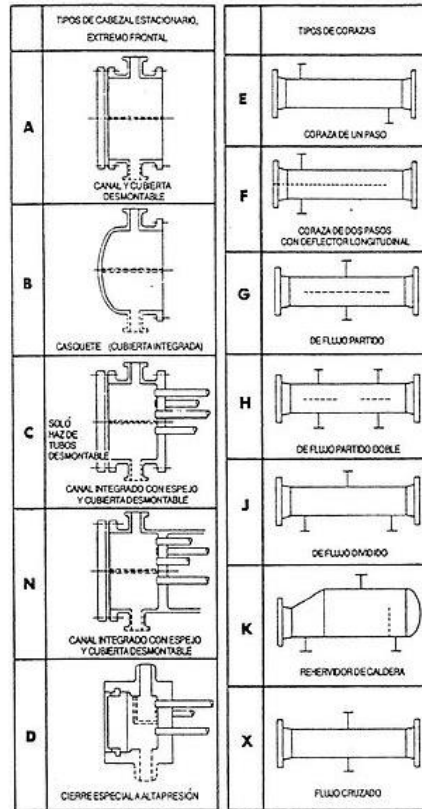


Figura 11.14: Selecció del TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).

A la taula 11.36 hi ha l'explicació de les diferents tipus de carcassa:

Taula 11.36: Tipus de configuració de la carcassa segons la normativa TEMA.

TIPUS	DESCRIPCIÓ
E	Un sol pas
F	Dos passos amb pantalla flectora longitudinal
G	Fluxe distribuït
H	Doble flux distribuït
J	Flux dividit
K	Reboiler tipus Kettle
X	Flux creuat

A més, s'ha de tenir en compte els capçals de la carcassa, on en la figura 11.14 es mostren els diferents tipus, i a la taula 11.37 s'expliquen les característiques:

Taula 11.37: Tipus de configuració dels capçals segons TEMA.

TIPUS	DESCRIPCIÓ
-------	------------

A	Barril cilíndric o canal amb brides en ambdós extrems. Un permet l'accés al canal i l'altre subjecta la full de tubs fixa.
B	Barril cilíndric amb un bonet soldat a un extrem i una brida en l'altre
C	Una brida subjecta amb un pern i permet l'accés al canal. Presenta problemes de manteniment.
D	Utilitzat per altes pressions. El canal i la placa de tubs té una construcció fixa.
N	En el canal hi ha integrat el mirall i la cubeta desmuntable.

La configuració del TEMA es selecciona segons les propietats del fluid i el tipus d'operació. En aquest cas el tipus de TEMA escollit és B-E-M, i per el disseny del reboiler s'escull B-K-U. També, en aquest apartat s'escull el diàmetre dels tubs del bescanviador, el material de construcció i la disposició dels tubs en les plaques flectores(*baffle*).

La disposició dels tubs ve donada pel *pitch*. El pitch és la distància entre el centre de dos tubs consecutius. Per norma, el pitch recomanat és 1.25 vegades del diàmetre extern del tub. En la figura 11.15 es mostren les diferents disposicions típiques dels tubs:

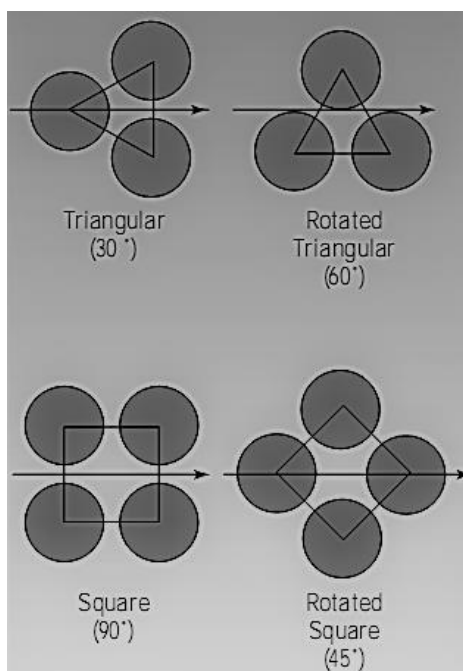


Figura 11.15: Diferents configuracions de distribució dels tubs.

Taula 11.37: Descripció dels diferents tipus de pitch.

TIPUS	DESCRIPCIÓ
TRIANGULAR 30°	És el més utilitza, ja que té la possibilitat d'utilitzar-se en qualsevol règim de circulació. Presenta factors d'embrutiment baixos.
QUADRAT 45°	S'utilitza en fluxos laminars amb $Re < 2000$.



QUADRAT 90°

S'utilitza en casos on la neteja és crítica i el flux és turbulent, també en casos de limitació de caiguda de pressió.

ROMBOIDAL 60°

Es el menys utilitzat degut a la gran caiguda de pressió.

En el disseny dels bescanviadors el *pitch* més adequat en aquests casos és el triangular 30°.

- Pas 2. Introducció de paràmetres del procés.**

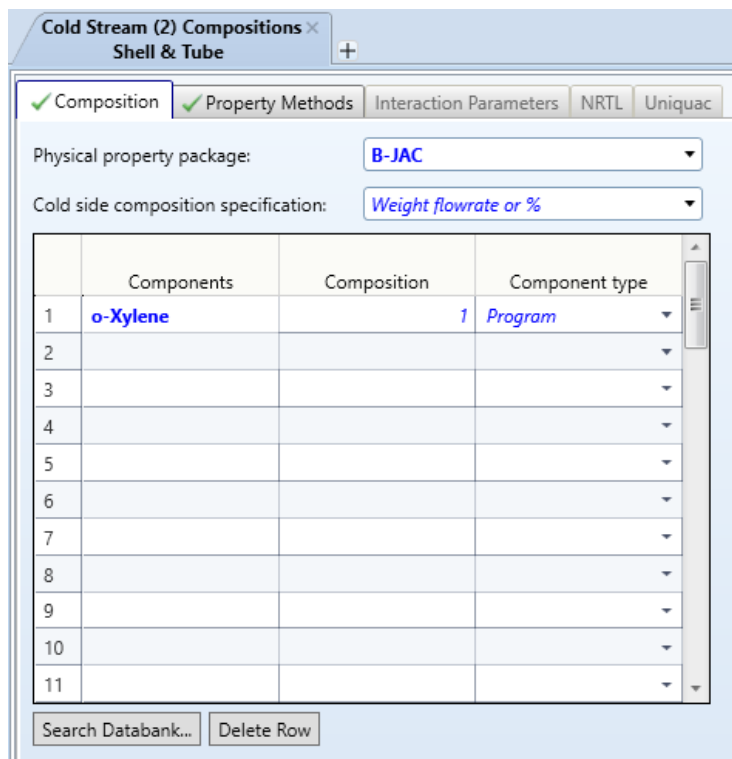
En aquest apartat, s'escull la localització de cada fluid, mitjançant les premisses citades a l'apartat 11.3., s'introdueixen les característiques principals dels corrents: temperatura, pressió, caudal i calor bescanviat. Això, es pot veure a la figura 11.16:

Figura 11.16: Process Data.

Les dades emplenades al *Process Data* s'obtenen amb el disseny previ de la planta mitjançant *Aspen Hysys*.

- Pas 3. Introducció de la composició dels fluids.**

El tercer pas és escollir els components que formen els fluids de la carcassa i els tubs. Aquests s'expressen en fraccions màssiques i/o molars, com es presenta a continuació en la figura 11.17.



	Components	Composition	Component type
1	o-Xylene	1	Program
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Figura 11.17: Composició dels corrents.

Les composicions màssiques i/o molars estan expressades en tant per u, llavors si només tenim un únic compost que forma el corrent el valor d'aquest serà 1.

- **Pas 4. Resultats del disseny.**

Una vegada s'han introduït totes les dades necessàries per al disseny, fem corre el programa i aquest intenta trobar el disseny més òptim.

En l'apartat de resultats trobem el TEMA Sheet on recull totes les dades d'interès, on es mostra a la figura 11.18:

TEMA Sheet																						
1	Company:																					
2	Location:																					
3	Service of Unit:				Our Reference:																	
4	Item No.:				Your Reference:																	
5	Date:		Rev No.:		Job No.:																	
6	Size :		449 / 744		2438,4		mm		Type:		BKU Horizontal		Connected in:		1 parallel		1 series					
7	Surf/unit(eff.)		36,2		m ²		Shells/unit		1		Surf/shell(eff.)		36,2		m ²							
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT																					
9	Fluid allocation				Shell Side				Tube Side													
10	Fluid name				O-Xilè				THEO-VP1													
11	Fluid quantity, Total				kg/s				2,0833													
12	Vapor (In/Out)				kg/s				0		2,0833		2,625		0							
13	Liquid				kg/s				2,0833		0		0		2,625							
14	Noncondensable				kg/s				0		0		0		0							
15																						
16	Temperature (In/Out)				°C				25		249,99		380		200							
17	Dew / Bubble point				°C						194,44		274,62		273,55							
18	Density Vapor/Liquid				kg/m ³				/ 875,29		8,08 / 717,01		4,59 /		/ 913,34							
19	Viscosity				mPa-s				/ 0,7884		0,0102 / 0,1856		0,0116 /		/ 0,408							
20	Molecular wt, Vap										106,16		166									
21	Molecular wt, NC																					
22	Specific heat				kJ/(kg-K)				/ 1,791		1,823 / 2,202		2,02 /		/ 1,846							
23	Thermal conductivity				W/(m-K)				/ 0,1393		0,023 / 0,0858		0,0327 /		/ 0,1498							
24	Latent heat				kJ/kg						315,9		287,7									
25	Pressure (abs)				bar				3,04		2,95382		1,5		1,3757							
26	Velocity (Mean/Max)				m/s				0,65 / 1,28				26,84 / 53,44									
27	Pressure drop, allow./calc.				bar				0,49987		0,08618		0,15513		0,1243							
28	Fouling resistance (min)				m ² -K/W				0,00018				0,00018		0,00022 Ao based							
29	Heat exchanged				1613256				W		MTD (corrected)		106,22		°C							
30	Transfer rate, Service				426,6				Dirty		452,3		Clean		551,6 W/(m ² -K)							
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL																					
32					Shell Side				Tube Side				Sketch 									
33	Design/Vacuum/test pressure				bar				3,44738 /		/ 3,44738 /											
34	Design temperature				°C				287,78		415,56											
35	Number passes per shell								1		4											
36	Corrosion allowance				mm				0		0											
37	Connections				In		mm		1 50,8 /		- 1 203,2 /						-					
38	Size/Rating				Out				1 101,6 /		- 1 38,1 /						-					
39	Nominal				Intermediate				/		-		/		-							
40	Tube No.		118		Us OD		19,05		Tks Average		1,65		mm Length		2438,4		mm Pitch		23,81		mm	
41	Tube type		Plain		#/m		Material		SS 316L		Tube pattern		30									

Figura 11.18: TEMA Sheet .

Tal i com s'observa en la figura 11.18 es recullen totes les dades del disseny, amb les quals es comprova si els paràmetres calculats anteriorment amb el mètode de Kern són semblants. Per exemple, el coeficient global de transmissió de calor o la mitjana logarítmica de l'increment de temperatura.

En aquest apartat es fa un estudi dels resultats obtinguts amb *Aspen Exchanger Desing and Rating* per veure si els valors es troben dins dels rangs típics.

Un altre apartat dels resultats és el *Recap of desing*, és una taula que recull els paràmetres més significatius del disseny el qual es poden canviar segons la necessitat, com es mostra en la figura 11.19:

Recap of Design		
Current selected case: A		
		A
Shell ID	mm	387,35
Tube length - actual	mm	3657,6
Tube length - required	mm	3244,3
Pressure drop, SS	bar	0,05906
Pressure drop, TS	bar	0,08709
Baffle spacing	mm	
Number of baffles		0
Tube passes		2
Tube number		121
Number of units in series		1
Number of units in parallel		1
Total price	Dollar(US)	21045
Program mode		Design (Sizing)
Calculation method		Standard method
Area Ratio (dirty)		1,13
Film coef overall, SS	W/(m² K)	4431,8
Film coef overall, TS	W/(m² K)	1428
Heat load	kW	1532,2
Recap case fully recoverable		Yes

Figura 11.19: Recap of desing.

En la figura 11.19 observem que el simulador calcula el valor aproximat del bescanviador, cosa que facilita a l'hora de fer l'avaluació econòmica. També, al seleccionar els paràmetres desitjats podem fer diferents simulacions canviant valors, i fer un estudi d'optimització.

11.4 DECOMPOSER DP-0301

11.4.1 Disseny mecànic del decomposer

Per al disseny mecànic del decomposer DP-0301, el material que s'ha escollit per a la construcció és AISI 316L recobert interiorment per una capa de tefló que protegirà l'equip contra una possible corrosió. Per al disseny s'ha seguit el mateix procediment que l'apartat de tancs. A continuació es mostren els resultats obtinguts.

11.4.1.1 Determinació del gruix del cos cilíndric i del cap i fons toriesfèric

A la taula 11.38 es mostren les dades necessàries per als càlculs corresponents al gruix de cada part del decomposer i l'alçada de les mateixes que es podran detallar a continuació.

Taula 11.38.- Dades i resultats per a la determinació del gruix del decomposer DP-0301.

	Cos cilíndric	Cap i fons toriesfèric
Temperatura disseny [°C]	275	275
Pressió disseny [psi]	14,94	14,94
S	15700	15700
E	0,85	0,85
C ₁ [in]	0,07874	0,07874
C ₂ [in]	0	0,01530
ρ [kg/m ³]	1131	1131
t [in]	0,1530	0,2086
t [mm]	3,885	5,299
t arrodonit [mm]	4	6

11.4.1.2 Determinació de l'alçada del decomposer

L'alçada real del decomposer és la suma de l'alçada del cos cilíndric i cos toriesfèric.

Taula 11.39.- Resultats per a la determinació de l'alçada de la columna DP-0301.

De [mm]	2271
h ₁ [mm]	21,00
h ₂ [mm]	435,2
H fons [mm]	462,2
H cap [mm]	462,2
H columna [mm]	4319

11.4.1.3 Determinació del pes del decomposer

S'ha considerat que el decomposer està ple de líquid en un 50%.

Taula 11.40.- Resultats pel volum dels elements constituents del decomposer DP-0301.

volum toriesfèric [m ³]	0.9479
volum cilindre [m ³]	17,38
volum material [m ³]	0,1430
volum total columna [m ³]	19,27

Taula 11.41.- Resultats per a la determinació del pes del decomposer DP-0301.

densitat material [kg/m ³]	7960
densitat líquid [kg/m ³]	1131
pes cilindre [kg]	979,6
pes toriesfèric [kg]	79,45
pes buit [kg]	1139
pes líquid [kg]	10819
pes total [kg]	11957

11.4.1.4 Mitja canya

Taula 11.42.- Resultats obtinguts de la mitja canya del decomposer DP-00301.

Q [kJ/kg]	$3,169 \cdot 10^5$
m vapor [kg/h]	139,4
Q _v [m ³ /s]	$5,692 \cdot 10^{-3}$
A nominal [m ²]	$3,557 \cdot 10^{-4}$
D mitja canya [m]	0,2128
A espira [m ²]	0,1519
ΔT_{ml}	20,54
L [m]	128,2
N espira	57
D espira [m]	0,01690
A disponible [m ²]	24,66

11.4.1.5 Agitador

Tot seguit s'adjunten els resultats de les especificacions de l'agitador del decomposer.

Taula 11.43.- Resultats obtinguts de l'agitador del decomposer DP-00301.

Nº eixos d'agitació	3	Np	6,5
H [m]	3,395	NRm [s ⁻¹]	0,8409
Dt [m]	2,271	NR [s ⁻¹]	1,0
W [m]	0,2271	Re	$7,563 \cdot 10^5$
d ₂ [m]	0,7571	D ₂ [m ²]	0,7571
d ₁ [m]	0,5678	viscositat fluid [Pa·s]	$8,572 \cdot 10^{-4}$
h ₁ [m]	2,716	Densitat fluid [kg/m ³]	1131
h ₂ [m]	0,7571	Potència [kW]	1,829
h ₃ [m]	0,1514	Potència total [kW]	5,486

Distància entre eixos	0,80
-----------------------	------

11.5 DECOMPOSER DP-0302

11.5.1.1 Determinació del gruix del cos cilíndric i del cap i fons toriesfèric

El decomposer s'ha dissenyat seguint el mateix procediment que DP-0301. En la taula 11.44 es mostren les dades necessàries per als càlculs corresponents al gruix de cada part del decomposer i l'alçada de les mateixes que es podran detallar a continuació.

Taula 11.44.- Dades i resultats per a la determinació del gruix del decomposer DP-0302.

	Cos cilíndric	Cap i fons toriesfèric
Temperatura disseny [°C]	275	275
Pressió disseny [psi]	14,94	14,94
S	15700	15700
E	0,85	0,85
C ₁ [in]	0,07874	0,07874
C ₂ [in]	0	0,01525
ρ [kg/m ³]	1137	1137
t [in]	0,1525	0,2079
t [mm]	3,873	5,280
t arrodonit [mm]	4	6

11.5.1.2 Determinació de l'alçada del decomposer

L'alçada real del decomposer és la suma de l'alçada del cos cilíndric i cos toriesfèric.

Taula 11.45.- Resultats per a la determinació de l'alçada de la columna DP-0302.

De [mm]	2258
h ₁ [mm]	21,00
h ₂ [mm]	432,6
H fons [mm]	459,6
H cap [mm]	459,6
H columna [mm]	4294

11.5.1.3 Determinació del pes del decomposer

S'ha considerat que el decomposer està ple de líquid en un 50%.

Taula 11.46.- Resultats pel volum dels elements constituents del decomposer DP-0302.

volum toriesfèric [m ³]	0.9309
volum cilindre [m ³]	17,07
volum material [m ³]	0,1413
volum total columna [m ³]	18,93

Taula 11.47.- Resultats per a la determinació del pes del decomposer DP-0302.

densitat material [kg/m ³]	7960
densitat líquid [kg/m ³]	1137
pes cilindre [kg]	967,9
pes toriesfèric [kg]	78,50
pes buit [kg]	1125
pes líquid [kg]	10680
pes total [kg]	11805

11.5.1.4 Mitja canya

Taula 11.48.- Resultats obtinguts de la mitja canya del decomposer DP-0302.

Q [kJ/kg]	$3,141 \cdot 10^5$
m vapor [kg/h]	138,2
Q _v [m ³ /s]	$5,642 \cdot 10^{-3}$
A nominal [m ²]	$3,526 \cdot 10^{-4}$
D mitja canya [m]	0,2119
A espira [m ²]	0,1503
ΔT_{ml}	20,54
L [m]	127,6
N espira	57
D espira [m]	0,01677
A disponible [m ²]	24,36

11.5.1.5 Agitador

Tot seguit s'adjunten els resultats de les especificacions de l'agitador del decomposer.

Taula 11.49.- Resultats obtinguts de l'agitador del decomposer DP-0302.

Nº eixos d'agitació	5	Np	6,5
---------------------	---	----	-----

H [m]	3,375
Dt [m]	2,258
W [m]	0,2258
d ₂ [m]	0,4515
d ₁ [m]	2,258
h ₁ [m]	2,700
h ₂ [m]	0,7525
h ₃ [m]	0,09031
Distància entre eixos	0,50

NRm [s ⁻¹]	1,401
NR [s ⁻¹]	2,0
Re	4,82·10 ⁵
D ₂ [m ²]	0,4515
viscositat fluid [Pa·s]	9,626·10 ⁻⁴
Densitat fluid [kg/m ³]	1137
Potència [kW]	1.110
Potència total [kW]	5,548

11.6 COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ C-0301

La separació de components de diferents volatilitats es realitza a través de columnes de destil·lació. Per al disseny de la columna de destil·lació s'ha utilitzat el simulador de processos químics Aspen HYSYS per realitzar una aproximació (*short cut*) i el mètode rigorós.

La primera destil·lació es basa en la separació de l'anhídrid maleic de la resta dels components. L'anhídrid maleic sortirà per caps de columnes i aquesta s'emmagatzemarà en tancs per a comercialitzar.

El mètode *short cut* necessita els paràmetres com la pressió del condensador i reboiler, el component clau pesat pel destil·lat (*heavy key*) i el component clau lleuger per cues (*light key*). Els components claus són aquells en el qual es basa la destil·lació i s'obté tant per destil·lat com per cues. Es considera que la pressió no varia al llarg de la columna. En aquest cas el *heavy key* és l'anhídrid ftàlic i el *light key* l'anhídrid maleic.

En la taula 11.50 es mostren els resultats per a aquesta aproximació.

Taula 11.50.- Dades obtingudes a partir del mètode short cut.

Etapas/plats	
Número mínim de plats	6,701
Número actual de plats	16,33
Plat de l'aliment òptim	11,32
Temperatures	
Temperatura condensador [°C]	168,9
Temperatura reboiler [°C]	254,5
Cabals	
Vapor rectificat [kmol/h]	10,91
Líquid rectificat [kmol/h]	6,413

Stripping vapor [kmol/h]	10,91
Stripping líquid [kmol/h]	43,83
Energia condensador [kJ/h]	-5,298·10 ⁵
Energia reboiler [kJ/h]	1,253·10 ⁶

A partir d'aquesta aproximació pel mètode *short cut* es du a terme el mètode rigorós on es necessari definir el cabal d'entrada a partir del balanç de matèria, la relació de reflux calculada com un 120% de la mínima requerida i utilitzant els paràmetres de la taula 11.50.

Mitjançant el complement de Hysys *Equipment Desgin i Tray Sizing* s'han realitzat els dissenys interns de les columnes. Segons el cabal i les condicions d'operació de cada columna, s'ha escollit el tipus més adient, ja sigui de plats o empacada.

11.6.1 Selecció del tipus de columna

Per tal de maximitzar la separació dels components del sistema a tractar i l'eficiència del procés, és important un bon disseny intern així com la selecció del tipus de columna. A continuació es presenten les característiques d'ambdós tipus de columnes.

Columna de rebliment:

- Menor temps de retenció del líquid.
- Valors alts de treball de relació líquid-gas.
- Pèrdua de càrrega baixa.
- Operen amb menor bombolleig de gas en el líquid.
- El rebliment augmenta la relació àrea-volum, millorant així la transferència.
- Pressions baixes.
- Òptima per a substàncies corrosives.
- Substàncies que generen grumolls i escumes.

Columna de plats:

- Major facilitat de neteja.
- Major facilitat de control de la temperatura de treball.
- Les corrents laterals són més fàcilment eliminades en les torres de plats.
- Menor cost de manteniment.
- Rang d'operació més ampli i variable.
- El pes sol ser menor reduint així certs costos com els suports.

Finalment, s'ha escollit una columna de rebliment ja que és més òptima i econòmica a llarg termini. També tenen una menor pèrdua de càrrega i són més eficients degut al major contacte entre les dues fases.

11.6.1.1 Tipus de rebliment

La funció principal del rebliment és proporcionar una superfície de contacte més ampla entre el vapor i el líquid extractor, d'aquesta manera fa que augmenti la seva turbulència i, per tant, millora la seva eficàcia.

A mesura que augmenta la mida del rebliment, l'eficàcia de la transferència de matèria, va disminuint i per tant, augmenten les pèrdues de càrrega. Per tal de poder determinar quina és la mida òptima del rebliment s'han de tenir en compte dos factors, la selecció del material i l'ordenació del material inert. A continuació, s'explica els tipus de rebliment que n'hi ha:

- Aleatori: és el més utilitzat en l'actualitat pel que fa a l'àmbit comercial, ja que és més econòmic que el rebliment estructurat. Es basa en unitats o peces discretes amb una forma geomètrica específica les quals són dipositades dins de la columna de forma aleatòria.
- Estructurat: és aproximadament de 3 a 10 vegades més per car per unitat de volum que el rebliment desordenant, però aporta una major capacitat i eficiència i proporciona una menor pèrdua de càrrega per etapa teòrica.

Per a la columna C-0301 s'ha decidit utilitzar un rebliment aleatori enlloc d'un estructurat degut a que present millors coeficients de transferència tot i que té major pèrdua de càrrega.

En aquest cas, el material utilitzat per al rebliment és *Jaeger TriPacks* de plàstic de 2 polsades ja que és el tipus de rebliment que s'ha obtingut amb una alçada equivalent de plat teòric més petita (HETP), definida com la porció de llit en la qual s'aconsegueix l'equilibri de distribució donat per la relació d'equilibri. A la figura 11.20 es mostra una imatge del rebliment utilitzat.



Figura 11.20: Rebliment aleatori Jaeger TriPack de plàstic de 2 polsades.

11.6.1.2 Distribuïdors de líquids

En una columna existeixen varies entrades de líquid, per exemple a l'aliment i el retorn del condensador. Al entrar líquid cal distribuir-se uniformement per tota la secció de la columna per a que no perdi rendiment. Els distribuïdors de líquid han de proporcionar una distribució uniforme del líquid, resistència a la obstrucció, una alta flexibilitat en les variacions dels fluxos que circulen per la columna així com una baixa caiguda de pressió.

S'ha escollit col·locar un distribuïdor de líquid a la part superior de la columna per tal d'assegurar una bona distribució del mateix i que la circulació d'aquest al llarg de la columna sigui uniforme i ocupi tota l'àrea superficial del rebliment. D'aquesta manera contraresta la tendència que té el líquid a fluir cap a les parets disminuint de manera considerablement l'eficiència de la mateixa. A la figura 11.21 es mostra el distribuïdor que s'ha escollit.



Figura 11.21: Distribuïdor de líquid.

11.6.1.3 Redistribuïdors de líquid

Els redistribuïdors de líquid s'utilitzen quan s'introdueix un aliment líquid intermig en les columnes de rebliment i entre seccions de rebliment per tal d'assegurar la bona distribució del líquid i suportar part del pes de la columna que té per sobre.

Normalment es col·loquen cada 9 metres però en molts casos quan no es pot preveure amb detall la mala distribució del líquid a la columna i per tant l'eficiència d'aquesta, es col·loquen cada 6 metres. En aquest cas la columna té una alçada aproximada de 10 metres, per tant, només es col·locarà un.

11.6.1.4 Suport de rebliment

Els suports de rebliment han de suportar físicament el rebliment, evitar la migració descendent de peces de rebliment i de proveir la suficient àrea oberta amb l'objectiu de permetre un flux sense restriccions entre el líquid i el vapor. A la figura 11.22 es mostra el suport escollit, és un *Retaining grid for random packings RPB* per a rebliments aleatoris i es col·loca a la part inferior del mateix rebliment.

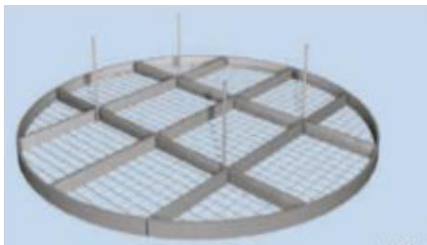


Figura 11.22: Suport de rebliment.

11.6.1.5 Entrada del líquid

L'entrada de líquid es fa a través d'un injector líquid del tipus LV (2) inlet, com es pot observar en la figura 11.23. S'utilitza per aliments que entren 100% en fase líquida i en columnes dotades d'un gran diàmetre.



Figura 11.23: Entrada a l'aliment.

11.6.2 Disseny mecànic de la columna

Per al disseny mecànic de la columna C-0301, el material que s'ha escollit per a la construcció és AISI 316L recobert interiorment per una capa de tefló que protegirà l'equip contra una possible corrosió.

Per a la determinació del gruix de la columna, es dissenya com un recipient vertical a pressió tenint en compte el codi ASME com a referència, concretament la secció VIII divisió 1.

El disseny es basa en calcular el gruix necessari de la placa per a cada tipus de secció i determinar la pressió màxima que pot suportar. Aquests càlculs dependran de diàmetres interiors, longituds, coeficients i de la resistència del material escollit.

11.6.2.1 Determinació del gruix del cos cilíndric i del cap i fons toriesfèric

Per tal de poder realitzar el disseny mecànic d'aquesta columna, el gruix de les parets s'ha de dissenyar tant a pressió interna com a externa, degut a que la pressió a l'interior del tanc és inferior a la atmosfèrica.

Cal dir que el complement del simulador HYSYS *Tray Sizing*, ha dividit la columna en dues seccions. A continuació es mostrarà els resultats tant de la primera secció com de la segona.

A la taula 11.50 es mostren les dades necessàries per als càlculs corresponents al gruix de cada part de la columna i l'alçada de les mateixes que es podran detallar a continuació.

Taula 11.50.- Dades i resultats per a la determinació del gruix de la columna C-0301 per a les dues seccions.

	SECCIÓ 1		SECCIÓ 2	
	Cos cilíndric	Cap i fons toriesfèric	Cos cilíndric	Cap i fons toriesfèric
Temperatura disseny [°C]	165	165	165	165
Pressió disseny [psi]	9,428	9,428	9,428	9,428
S	15700	15700	15700	15700
E	0,85	0,85	0,85	0,85
C ₁ [in]	0,07874	0,07874	0,07874	0,07874
C ₂ [in]	0	0,009445	0	0,009283
ρ [kg/m ³]	1137	1137	1137	1137
t [in]	0,09445	0,1126	0,09283	0,1099
t [mm]	2,399	2,860	2,358	2,791

t arrodonit [mm]	3	3	3	3
------------------	---	---	---	---

Tant la pressió i la temperatura de disseny s'ha calculat a partir del procediment descrit a l'apartat de tancs.

11.6.2.2 Determinació de l'alçada de la columna

L'alçada real de la columna és la suma de l'alçada del cos cilíndric i cos toriesfèric.

Taula 11.51.- Resultats per a la determinació de l'alçada de la columna C-0301 per a les dues seccions.

	SECCIÓ 1	SECCIÓ 2
De [mm]	463,2	614,3
h ₁ [mm]	10,50	10,50
h ₂ [mm]	87,10	116,6
H fons [mm]	100,6	130,1
H cap [mm]	100,6	130,1
H columna [mm]	6780	2716

11.6.2.3 Determinació del pes de la columna

Per a totes les columnes dissenyades s'ha considerat que la columna està plena de líquid en un 50%.

Taula 11.52.- Resultats pel volum dels elements constituents de la columna C-0301 per a les dues seccions.

	SECCIÓ 1	SECCIÓ 2
volum toriesfèric [m ³]	0,008040	0.01876
volum cilindre [m ³]	1,113	0,7927
volum material [m ³]	0,03002	0,01231
volum total columna [m ³]	1,099	0,8302

Taula 11.53.- Resultats per a la determinació del pes de la columna C-0301 per a les dues seccions.

	SECCIÓ 1	SECCIÓ 2
densitat material [kg/m ³]	7960	7960
densitat líquid [kg/m ³]	1137	1137
pes cilindre [kg]	234,1	98,00

pes toriesfèric [kg]	2,455	3,412
pes buit [kg]	236,5	106,1
pes rebliment [kg]	73,50	50,60
pes líquid [kg]	624,8	464,5
pes total [kg]	934,9	621,2

11.6.2.4 Disseny del faldó de la columna

El faldó és un dels suports empleats més freqüentment en els recipients verticals ja que ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura continua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó. La unió soldada entre el faldó i la columna és la part més crítica perquè, a més de suportar tot l'esforç generat per la combinació de càrregues externes, ha de suportar els esforços tèrmics degut a la variació de temperatura (per estar en contacte directe amb el recipient). És recomanable aïllar tèrmicament el faldó (mantenint a una temperatura uniforme) de manera que es minimitzi els esforços tèrmics.

L'alçada del faldó és d'un metre i el material emprat és acer inoxidable 316L. Amb aquest tipus de suport, la càrrega es reparteix uniformement al llarg del perímetre de la circumferència de la soldadura i així es disminueix la pressió transmesa al terra. Les columnes hauran d'incloure una escala, el qual l'altura és igual a l'altura de la columna i la seva amplada és de 0.5 m.

11.6.2.5 Càlcul del gruix de l'aïllament

En referència al sistema d'aïllament, s'ha optat per aïllar les columnes amb una manta de llana de roca de 100 kg/m^3 recoberta exteriorment per una capa d'alumini per evitar que la llana es faci malbé. Aquesta llana posseeix excel·lents propietats d'aïllament tèrmic que es mantenen intactes amb la presència de foc i poden resistir temperatures fins a 750°C . La caiguda de temperatura a través de la capa d'aïllant és més que suficient per protegir qualsevol material combustible.



Figura 11.24: Manta de llana de roca amb recobriments d'alumini.

11.7 COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ C-0302

La segona destil·lació es basa en la separació de l'anhídrid ftàlic de la resta dels components. L'anhídrid ftàlic sortirà per caps de columnes i aquesta s'emmagatzemarà en tancs per a comercialitzar.

Aquesta columna s'ha dissenyat seguint el mateix procediment que la columna C-0301. En la taula 11.54 es mostren els resultats de l'aproximació pel mètode *short cut*. En aquest cas el *heavy key* és el producte pesant (*heavy*) i el *light key* l'anhídrid ftàlic.

Taula 11.54.- Dades obtingudes a partir del mètode *short cut*.

Etapas/plats	
Número mínim de plats	9.620
Número actual de plats	28.66
Plat de l'aliment òptim	5.000
Temperatures	
Temperatura condensador [°C]	196.8
Temperatura reboiler [°C]	258.0
Cabals	
Vapor rectificat [kmol/h]	38.78
Líquid rectificat [kmol/h]	6.597
Stripping vapor [kmol/h]	38.78
Stripping líquid [kmol/h]	39.52
Energia condensador [kJ/h]	$-2.290 \cdot 10^6$
Energia reboiler [kJ/h]	$1.901 \cdot 10^6$

11.7.1 Selecció del tipus de columna

Finalment, en aquest cas també s'ha escollit una columna de rebliment ja que és més òptima i econòmica a llarg termini. També tenen una menor pèrdua de càrrega i són més eficients degut al major contacte entre les dues fases.

Tant el rebliment com el suport del rebliment s'han utilitzat el mateix que la columna C-0301.

També s'ha col·locat el mateix distribuïdor i redistribuidor de líquid però en aquest cas s'ha col·locat un per l'entrada de líquid i una a la part intermitja superior (part d'enriquiment) ja que aquesta columna té una alçada de 20 metres.

L'entrada de líquid es fa a través d'un injector líquid del tipus LV (2) inlet.

11.7.2 Disseny mecànic de la columna

Per al disseny mecànic de la columna C-0302, el material que s'ha escollit per a la construcció és AISI 316L recobert interiorment per una capa de tefló que protegirà l'equip contra una possible corrosió. Per al disseny s'ha seguit el mateix procediment que en l'apartat anterior per a tots els subapartats. A continuació es mostren els resultats obtinguts.

11.7.2.1 Determinació del gruix del cos cilíndric i del cap i fons toriesfèric

A la taula 11.55 es mostren les dades necessàries per als càlculs corresponents al gruix de cada part de la columna i l'alçada de les mateixes que es podran detallar a continuació.

Taula 11.55.- Dades i resultats per a la determinació del gruix de la columna C-0302.

	Cos cilíndric	Cap i fons toriesfèric
Temperatura disseny [°C]	269,6	269,6
Pressió disseny [psi]	7,252	7,252
S	15700	15700
E	0,85	0,85
C ₁ [in]	0,07874	0,07874
C ₂ [in]	0	0,01427
ρ [kg/m ³]	1029	1029
t [in]	0,1427	0,1920
t [mm]	3,624	4,877
t arrodonit [mm]	4	5

Tant la pressió i la temperatura de disseny s'ha calculat a partir del procediment descrit a l'apartat de tancs.

11.7.2.2 Determinació de l'alçada de la columna

L'alçada real de la columna és la suma de l'alçada del cos cilíndric i cos toriesfèric.

Taula 11.56.- Resultats per a la determinació de l'alçada de la columna C-0302.

De [mm]	1074
h ₁ [mm]	17,50
h ₂ [mm]	204,2
H fons [mm]	226,7
H cap [mm]	226,7
H columna [mm]	19583

11.7.2.3 Determinació del pes de la columna

Per a totes les columnes dissenyades s'ha considerat que la columna està plena de líquid en un 50%.

Taula 11.57.- Resultats pel volum dels elements constituents de la columna C-0302.

volum toriesfèric [m ³]	0,1003
volum cilindre [m ³]	17,51
volum material [m ³]	0,2427
volum total columna [m ³]	17,71

Taula 11.58.- Resultats per a la determinació del pes de la columna C-0302.

densitat material [kg/m ³]	7960
densitat líquid [kg/m ³]	1029
pes cilindre [kg]	1900
pes toriesfèric [kg]	16,05
pes buit [kg]	1932
pes rebliment [kg]	1146
pes líquid [kg]	8988
pes total [kg]	12066

11.7.2.4 Disseny del faldó de la columna

El faldó és un dels suports emprats més freqüentment en els recipients verticals ja que ha de suportar el pes de la columna. S'uneix a la columna per una soldadura continua en la part inferior i, en general, la grandària requerida d'aquesta soldadura determina l'espessor del faldó. L'alçada del faldó és de 2 m i el material emprat és acer inoxidable 316L. Amb aquest tipus de suport, la càrrega es reparteix uniformement al llarg del perímetre de la circumferència de la soldadura i així es disminueix la pressió transmesa al terra. Les columnes hauran d'incloure una escala, el qual l'altura és igual a l'altura de la columna i la seva amplada és de 0.5 m.

11.7.2.5 Càlcul del gruix de l'aïllament

En referència al sistema d'aïllament, s'ha optat per aïllar les columnes amb una manta de llana de roca de 100 kg/m^3 recoberta exteriorment per una capa d'alumini per evitar que la llana es faci malbé. Aquesta llana posseeix excel·lents propietats d'aïllament tèrmic que es mantenen intactes amb la presència de foc i poden resistir temperatures fins a $750 \text{ }^\circ\text{C}$. La caiguda de temperatura a través de la capa d'aïllant és més que suficient per protegir qualsevol material combustible.

11.8 DISSENY DE CANONADES

11.8.1 Càlcul del diàmetre nominal d'una fase

El disseny de les canonades ha de garantir una correcta circulació dels fluids, per aquest motiu hi juguen un paper important els diferents paràmetres que s'han de tenir en compte (cabal volumètric del fluid que hi circula i la pressió a la que ho fa). El cabal volumètric de cada línia es troba calculat en el balanç de matèria.

El primer pas és la suposició del diàmetre de la canonada, en aquest cas s'han escollit un diàmetre estàndard tal i com es mostra a la taula 11.59.

Taula 11.59.- Diàmetres estàndard per canonades.

Nominal Pipe Size	Diametro Nominal	Nominal Pipe Size	Nominal Diameter	Nominal Pipe Size	Nominal Diameter
NPS	DN	NPS	DN	NPS	DN
[pulgadas]	[mm]	[pulgadas]	[mm]	[pulgadas]	[mm]
1/8	6	6	150	48	1200
1/4	8	8	200	52	1300
3/8	10	10	250	56	1400
1/2	15	12	300	60	1500
3/4	20	14	350	64	1600
1	25	16	400	68	1700
1 1/4	32	18	450	72	1800
1 1/2	40	20	500	76	1900
2	50	24	600	80	2000
2 1/2	65	28	700	88	2200
3	80	32	800	96	2400
3 1/2	90	36	900	104	2600
4	100	40	1000	112	2800
4 1/2	115	42	1050	120	3000
5	125	44	1100	128	3200

Amb la suposició del diàmetre, es fixen uns valors de velocitat dins dels valors estàndard de circulació de gasos i líquids. A la taula 11.60 es mostren les velocitats típiques segons el tipus de fluid.

Taula 11.60.- Velocitats típiques de líquids i gasos.

Tipus de fluid	Tipus de circulació	Velocitat [m/s]
Líquid no viscos	Aspiració	0,6 – 0,9
	Línia de procés o impulsó	1,5 – 2,5
Líquid viscos	Aspiració	0,06 – 0,25
	Línia de procés o impulsó	0,15 – 0,6
Gas	-	9,0 – 36
Vapor	-	9,0 - 23

Amb l'equació (11.93) es calcula la velocitat corresponent a cada tipus de circulació amb el diàmetre interior de la canonada suposat.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D_i^2} \quad (11.94)$$

On v és la velocitat típica del fluid [m/s].

Q és el cabal volumètric del fluid [m³/s].

D_i és el diàmetre intern de la canonada [m].

Un cop obtingut el diàmetre de la canonada amb la velocitat típica del fluid, s'escull un dels valors de diàmetre (Nominal Pipe Size) proper als valors trobats. Un cop és té el diàmetre, en funció de la pressió de disseny, el tipus de material utilitzat s'escull l'Schedule que determinarà el gruix final de la canonada.

La pressió de disseny és aquella pressió major que la pressió a les condicions més severes de pressió i temperatura coincidents, externa o internament que s'espera en les condicions d'operació normal. Com a regla general, s'escull la relació que es mostra amb l'equació (11.95).

$$P_{disseny} = 1,1 \cdot P_{operació} \quad (11.95)$$

Pel cas de la temperatura de disseny, com a valor estàndard se li sumen 15°C a la temperatura d'operació, tal i com es mostra a l'equació (11.96).

$$T_{disseny} = T_{operació} + 15 \quad (11.96)$$

11.8.2 Càlcul del diàmetre nominal de dos fases

11.8.3 Gruix d'aïllant

Igual que els equips de procés, per seguretat i per evitar consums energètics excessius i aconseguir que els fluids arribin als equips amb temperatures pròximes a les establertes, aquelles canonades que estan a la intempèrie no poden estar a una temperatura molt dispar a la temperatura ambient. Així doncs es necessari calorifugar aquelles línies que tinguin una temperatura en superfície inferior a 15°C i superior a 40°C.

L'aïllant escollit per a les línies que tenen una temperatura inferior a la ambient és l'escuma de poliuretà i per a les que la tenen superior es farà servir llana de roca. El gruix d'aïllament per canonades està establert a partir d'espessors estàndard¹.

11.9 BOMBES

11.9.1 Selecció de bombes

Pel disseny i selecció d'una bomba és necessari calcular la potència que ha de subministrar aquesta per transportar el fluid fins el punt on es requereix i a la pressió establerta.

Per calcular la potència de la bomba s'ha de realitzar un balanç d'energia mecànica des del punt inicial fins al punt final, mitjançant l'equació (11.97).

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) = \hat{w} - e_v \quad (11.97)$$

On ΔP és la diferència de pressió entre els dos punts de la línia estudiada.

ρ és la densitat del fluid [kg/m³].

g és l'acceleració de la gravetat [m/s²].

z_1 i z_2 és l'altura del líquid en els dos punts estudiats [m].

v_1 i v_2 és la velocitat del punt inicial i final [m/s].

α és el factor de correcció de l'energia cinètica. Per Reynolds menor que 2100, $\alpha=0,5$ i per Reynolds major que 2100, $\alpha=1$.

$\hat{w}$ és el treball per unitat de massa [J/kg].

e_v són les pèrdues de treball per fricció [J/kg].

L'equació (11.X) es pot simplificar si es considera que la velocitat entre ambdós punts de la línia és constant o que la diferència entre ambdues és petita. Això fa que el terme de la velocitat sigui menyspreable.

Pel que fa a les pèrdues de càrrega que es produeixen en trams rectes per la fricció del fluids amb les parts de les canonades i la turbulència d'aquestes, i en trams com accidents o accessoris que distorsionen el recorregut del fluid, s'ha calculat mitjançant l'equació (11.98).

$$e_v = (e_v)_{recte} + (e_v)_{accident} \quad (11.98)$$

Pel càlcul dels trams rectes es determinen a partir de l'equació (11.99).

$$(e_v)_{recte} = 4 \cdot f \cdot \frac{v^2 \cdot L}{2 \cdot D} \quad (11.99)$$

On f és el factor de fricció de Fanning, es determina mitjançant l'àbac de Moody.

v és la velocitat a la que circula el fluid per l'interior de la canonada [m/s].

L és la longitud de la canonada del tram recte [m].

D és el diàmetre intern de la canonada [m].

Per dur a terme aquest càlcul és necessari establir la rugositat relativa del material i el número de Reynolds. Per determinar la rugositat relativa es calcula dividint la rugositat absoluta, que depèn del material utilitzat, entre el diàmetre intern de la canonada.

Taula 11.61.- Dades de rugositat absoluta dels materials utilitzats.

Material	Rugositat [m]
Plàstic o tub llis	0
Acer al carboni	$4.6 \cdot 10^{-5}$
Acer inoxidable	$4.6 \cdot 10^{-5}$

Seguidament es calcula el número Reynolds a partir de l'equació (11.100).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (11.100)$$

On ρ és la densitat del fluids [kg/m^3].

v és la velocitat del fluid que circula per l'interior de la canonada [m/s].

D és el diàmetre intern de la canonada [m].

μ és la viscositat del fluid [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$].

Un cop determinat el número de Reynolds i la rugositat relativa i mitjançant l'àbac de Moody es determina el coeficient de fricció $4f$ amb la figura (11.25)

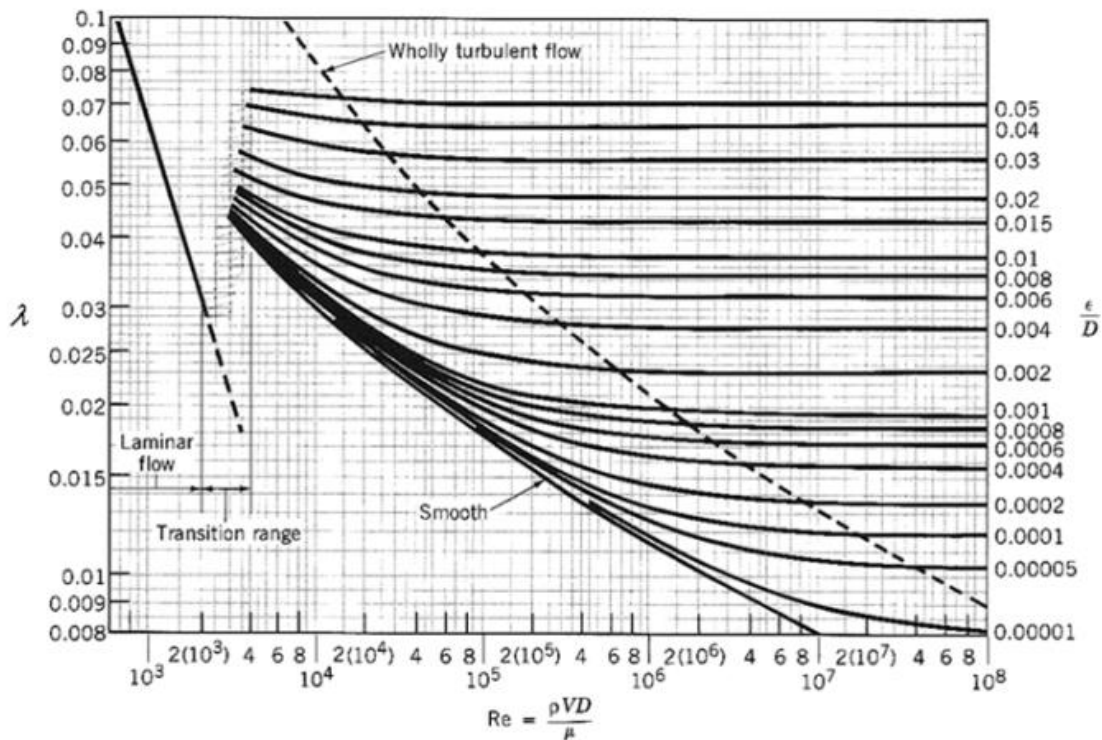


Figura 11.25: Àbac de Moody.

Un cop obtingut el coeficient de fricció $4f$, es determinen les pèrdues de càrrega per trams rectes.

Pel que fa a la determinació de les pèrdues de càrrega per accidents es calculen a partir de l'equació (11.101).

$$(e_v)_{\text{accident}} = K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (11.101)$$

On K és el factor de pèrdues per fricció i és un paràmetre que depèn dels diferents accessoris. Aquests valors es poden trobar en la figura (11.26).

Type of fitting or valve	Additional friction loss, equivalent no. of velocity heads, K
45° ell, standard ^{b,c,d,f}	0.35
45° ell, long radius ^c	0.2
90° ell, standard ^{b,c,d,f,g,h}	0.75
Long radius ^{b,c,d,e}	0.45
Square or miter ^b	1.3
180° bend, close return ^{b,c,d}	1.5
Tee, standard, along run, branch blanked off ^c	0.4
Used as ell, entering run ^{a,i}	1.0
Used as ell, entering branch ^{c,d,j}	1.0
Branching flow ^{i,j,k}	1 ^l
Coupling ^{a,c}	0.04
Union ^c	0.04
Gate valve, ^{b,c,m} open	0.17
¼ open	0.9
½ open	4.5
¾ open	24.0
Diaphragm valve, open	2.3
¼ open	2.6
½ open	4.3
¾ open	21.0
Globe valve, ^{c,m}	
Bevel seat, open	6.0
½ open	9.5
Composition seat, open	6.0
½ open	8.5
Plug disk, open	9.0
¼ open	13.0
½ open	36.0
¾ open	112.0
Angle valve, ^{b,n} open	2.0
Y or blowoff valve, ^{b,m} open	3.0
Plug cock	
θ = 5°	0.05
θ = 10°	0.29
θ = 20°	1.56
θ = 40°	17.3
θ = 60°	206.0
Butterfly valve	
θ = 5°	0.24
θ = 10°	0.52
θ = 20°	1.54
θ = 40°	10.8
θ = 60°	118.0
Check valve, ^{b,c,m} swing	2.0
Disk	10.0
Ball	70.0
Foot valve ^c	15.0
Water meter, ^b disk	7.0
Piston	15.0
Rotary (star-shaped disk)	10.0
Turbine-wheel	6.0

Figura 11.26: Valors típics dels accidents de canonades.

11.9.2 Càlcul de la potència de la bomba

La determinació de la potència de cada equip es realitza multiplicant el valor obtingut del treball segons el BEM i el cabal màssic de la línia, com es pot veure a l'equació (11.102).

$$P_{teòrica} = \hat{w} \cdot Q \quad (11.102)$$

On $P_{teòrica}$ és la potència teòrica de la bomba [W].

$\hat{w}$ és el treball per unitat de massa [J/kg].

Q és el cabal màssic del fluid que ha d'impulsar la bomba [kg/s].

S'ha de tenir en compte que no tota l'energia subministrada de la bomba s'utilitza per impulsar el fluid, part d'aquesta energia es dissipa en forma de calor i, per tant, se suposa que totes les bombes tinguin un 75% de rendiment, es pot obtenir la potència real a la que opera la bomba amb l'equació (11.103).

$$P_{real} = \frac{P_{teòrica}}{\eta} = \frac{P_{teòrica}}{0,75} \quad (11.103)$$

11.9.3 NPSH

L'NPSH (*Net Positive Suction Head*) és la càrrega de la bomba a l'aspiració. El càlcul de l'NPSH_{disponible} i la comprovació que és més gran que l'NPSH_{requerit} és necessari per evitar el fenomen de la cavitació que pot comportar importants problemes en el correcte desenvolupament del procés e integritat de la bomba.

Pel càlcul de l'NPSH_{disponible} s'utilitza l'equació (11.104).

$$NPSH_{disponible} = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (11.104)$$

On P és la pressió absoluta a l'entrada de la bomba [Pa].

γ és el pes específic del líquid [N/m³].

v és la velocitat a l'entrada de la bomba [m/s].

g és l'acceleració de la gravetat [m/s²].

P_v és el diàmetre de la canonada [m].

L'NPSH_{requerit} és una dada que proporciona el fabricant i depèn de diversos factors relacionats amb el disseny de la bomba.

11.9.4 Bomba al buit

En el procés és necessari la presència de bombes de buit per tal de disminuir la pressió per sota de l'atmosfèrica a l'interior de les columnes C-0301 i C-0302.

El mètode de càlcul que s'ha fet servir per tal d'estimar quina és la bomba que millor s'adapta a les condicions de treball la proporciona el mateix fabricant *Sterling*, amb l'equació (11.105).

$$S = \frac{V}{t_E} \cdot \ln\left(\frac{P_B}{P_E}\right) \quad (11.105)$$

On S és el cabal volumètric interior de la bomba [m³/h].

V és el volum a realitzar el buit [m³].

t_E és el temps d'evacuació [h].

P_B és la pressió a l'inici de l'evacuació [kPa].

P_E és la pressió al final de l'evacuació [kPa].

Cal dir que es fa una suposició de que el buit desitjat s'assoleix en 15 minuts. El cabal que s'obté no serà el definitiu, es sobredimensiona el valor un 40% ja que cal tenir en compte les possibles infiltracions d'aire de l'exterior.

11.10 COMPRESSORS

Els compressors de la planta seran de tipus centrífug. Per dur a terme la realització dels càlculs s'ha tingut en compte el cabal, temperatura i canvi de pressió.

Primer de tot, s'ha de determinar el número d'etapes que tindrà el compressor, en funció de la relació de compressió d'aquest. Una relació de compressió adequada per un compressor tipus centrífug va des de 2,5 a 5. Per realitzar els càlculs s'ha escollit un valor de 3,5.

$$r = \frac{P_n}{P_o} \quad (11.106)$$

On r és la relació de compressió.

P_n és la pressió d'impulsió [Pa].

P_o és la pressió d'aspiració [Pa].

La relació de compressió del compressor que necessita la planta es troba aplicant l'equació (11.106), per tant, per reduir aquesta relació, s'escull una relació que estigui dins del rang i es determina el número d'etapes mitjançant l'equació (11.107).

$$R = 3,5 = \sqrt[N]{\frac{P_n}{P_o}} \quad (11.107)$$

On R és la relació de compressió per etapa (valor suposat).

N és el número d'etapes.

Seguidament, es determina la potència que necessita el compressor mitjançant l'equació (11.108).

$$w = N \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{Z \cdot R \cdot T}{PM} \cdot \left(\left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{N \cdot \gamma}} - 1 \right) \quad (11.108)$$

On $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ = relació adiabàtica.

Z és el factor de compresibilitat.

R és la constant de gasos [J/kmol·K].

PM és el pes molecular [kg/kmol].

Seguidament es determina la potència amb l'equació (11.109).

$$W = w \cdot m \quad (11.109)$$

On W és la potència [W].

m és el cabal màssic [kg/h].

11.11 SERVEIS DE PLANTA

11.11.1 Aire comprimit

Per a l'elecció de l'equip d'aire comprimit és necessari fer una estimació del requeriment. La planta no disposa de cap equip que requereixi aire comprimit de forma intensiva, per tant, tot el consum vindrà de les vàlvules pneumàtiques.

Existeix una regla del polze per estimar el consum, s'estima que en operació de cada llaç requereix 1,5 m³/h i com a màxim 3 m³/h.

$$Q_{aire} = 3 \cdot N \quad (11.110)$$

On Q és el cabal d'aire a pressió requerit [m³/h].

N és el nombre de llaços de control que requereixen serveix.

11.11.2 Caldera d'oli tèrmic

A la planta disposem de dos olis tèrmics, Therminol-59 que s'utilitza en el *swich condenser* i Therminol-VP1 en tots els bescanviadors que hi ha. El requeriment necessari a la planta és Therminol-59 a una temperatura de 170°C i Therminol-VP1 a 380°C i 100°C.

- Per a la línia de 170°C amb Therminol-59 s'obté els requeriments energètic següents:

Equip	Cabal [kg/s]	T entrada [°C]	T sortida [°C]	Q aportar(kW)
SC-201	35	170	150	1393

Per a la potencia o calor aportada s'utilitza l'equació següent:

$$Q = C_{p_{THEO-59}}(\Delta T) \cdot m_{THEO-59} \quad (11.111)$$

On la capacitat calorífica del therminol-59 en aquestes condicions és $1,99^2$ kJ/kg · K.

S'observa que es necessita una caldera amb una capacitat mínima d'uns 1393 kW, per tant s'escull el model ATTSU FT1250 de 1454 kW de potencia útil. Es necessari tenir dues calderes per treballar alternament, realitzar manteniment, inspeccions i parades sense parar la producció.

- Per a la línia de 380°C amb Therminol-VP1 s'obté els requeriments energètic següents:

Equips	Cabal [kg/s]	T entrada [°C]	T sortida [°C]	Q aportar [kW]
E-201	19,20	380	200	7720
RB-201	2,64	380	200	1061
RB-301	1,67	380	308	268,0
RB-302	0,07	380	300	12,4
TOTAL	23,58	1520	1008	9062

Per a la potència necessària s'utilitza l'equació citada en l'apartat anterior, però la calor específica del Therminol-VP1 en aquestes condicions de temperatura és de $2,23^3$ kJ/kg · K.

S'observa que es necessita una caldera amb una capacitat mínima d'uns 9061 kW, per tant s'escull el model ATTSU FT8000 de 9303 kW de potencia útil. És necessari tenir

² Therminol-59, heat transfer fluid, by Solutia, Applied Chemistry, Creative Solutions.

³ Therminol-VP1, heat transfer fluid, by Solutia, Applied Chemistry, Creative Solutions.

dues calderes per treballar alternament, realitzar manteniment, inspeccions i parades sense parar la producció.

- Per a la línia de 100°C amb Therminol-VP1 s'obté els requeriments energètic següents:

Equips	Cabal [kg/s]	T entrada [°C]	T sortida [°C]	Q aportar [kW]
E-202	16	100	235	3725
E-203	15	100	235	3602
E-301	0,75	100	150	65,2
TOTAL	32	300	620	7393

Per a la potència necessària s'utilitza l'equació citada en l'apartat anterior, però la calor específica del Therminol-VP1 en aquestes condicions de temperatura és de $1.72^4 \text{ kJ/kg} \cdot K$

S'observa que es necessita una caldera amb una capacitat mínima d'uns 7393 kW, per tant s'escull el model ATTSU FT7000 de 8140 kW de potencia útil. Es necessari tenir dues calderes per treballar alternament, realitzar manteniment, inspeccions i parades sense parar la producció.

11.11.2.1 Consum de gas

Les calderes que disposem a la planta estaran treballant totes dues a l'hora, per tant els càlculs de consum de gas es presenten a continuació:

Característiques	Tipus caldera		
	FT1250	FT7000	FT8000
PCI [kW/m³]	10,7		
Consum gas [Nm³/h]·caldera	156	885	1011
Rendiment caldera	0,92		
Consum caldera [kW/dia]	240	288	360
Consum gas [Nm³/dia]	3744	21240	24264

Els valors del consum de gas, el rendiment de la caldera i PCI del combustible, s'obtenen del catàleg de l'empresa proveïdora de les calderes, ATTSU.

- Consum de gas global, CG

El consum de gas global quan operen les dues calderes a l'hora serà:

⁴ Therminol-VP1, heat transfer fluid, by SOLUTIA, Applied Chemistry, Creative Solutions.

$$\begin{aligned}
 Consum_{global} &= (CG_{FT1250} + CG_{FT7000} + CG_{FT8000}) \cdot 24h \\
 &= (156 + 885 + 1011) \frac{m^3}{h} \cdot 24h = 49248 \text{ } m^3
 \end{aligned}$$

- Consum global elèctric, CE

$$CE = (P_{FT6000} + P_{FT8000}) \cdot 24h = (10 + 12 + 15)kW \cdot 24h = 888 \frac{kW}{dia}$$

Per tant, diàriament les calderes gastaran un consum de gas serà de $49248 \text{ } m^3$ i $888 \frac{kW}{dia}$.